

Měření rázové houževnatosti polybutenů-1

Adam Ondřej

Bakalářská práce
2020

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Adam Ondřej**
Osobní číslo: **T18446**
Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Technologická zařízení**
Forma studia: **Prezenční**
Téma práce: **Měření rázové houževnatosti polybutenů-1**

Zásady pro vypracování

Ověření vlastností homopolymerů a kopolymerů PB-1. Vzorky budou připraveny vhodnou technologií a následně budou při vhodných teplotách zkoušeny (pod bodem mrazu) na přístroji pro měření rázové houževnatosti dle norem ISO 179 a ISO 180. Cílem práce bude nalézt vhodné nastavení podmínek měření pro měření transformovaného a netransformovaného polybutenu-1 při jednotných podmínkách zkoušky.

Forma zpracování bakalářské práce: **Tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

ČSN EN ISO 179-1 (640612) Plasty – Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy – Část 1: Neinstrumentovaná rázová zkouška
ČSN EN ISO 180 (640616) Plasty – Stanovení rázové houževnatosti metodou Izod
Film properties of plastics and elastomers, Elsevier/WA, 2012

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Lubomír Beníček, Ph.D.**
Ústav inženýrství polymerů

Datum zadání bakalářské práce: **2. ledna 2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **15. května 2020**

L.S.

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan

prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 15. dubna 2020

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce je stanovit ideální podmínky pro měření rázové houževnatosti homopolymeru a kopolymeru polybutenu-1

V teoretické části práce jsou popsány vybrané vlastnosti polybutenu-1, jeho výroba a využití v praxi. Dále je v teoretické části práce popsán průběh zkoušení rázové houževnatosti, včetně popisu šíření trhlin a lomové houževnatosti. V závěru teoretické části je popis statistického vyhodnocení výsledků zkoušky.

Praktická část popisuje použité materiály a jejich vlastnosti. Následně je popsán proces výroby zkušebních těles pro vykonání zkoušek rázové houževnatosti, včetně popisu strojů pro měření rázové houževnatosti. Následuje výpis naměřených hodnot, včetně jejich statistického a grafického zpracování, s následnou diskuzí výsledků, kde budou popsány vnější vlivy na výsledky měření.

Klíčová slova: polybuten, mechanické vlastnosti, statistické vyhodnocení, rázová houževnatost

ABSTRACT

The purpose of this bachelor thesis is to determine the ideal conditions for impact testing of the polybutene-1 homopolymer and copolymer.

The specific properties of polybutene-1, its production and use is described in the theoretical part as well as the description of fracture propagation and fracture toughness. Statistical evaluation of the impact testing measurement is included at the end of the theoretical part.

Practical part describes the materials used and its properties. The production process of specimen used in the impact testing measurement is described after with the description of measuring devices included. Then The listing of values measured follows, with the statistical and graphical evaluation as well as the results discussion, where the external agents affecting the measurements are described.

Keywords: Polybutene, Mechanical properties, statistical evaluation, impact testing

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu své bakalářské práce, Ing. Lubomíru Beníčkoví, Ph.D. za jeho energii a čas, které mi věnoval při pomoci s tvorbou bakalářské práce.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 POLYMERY	11
1.1 POLYOLEFINY.....	11
2 POLYBUTEN-1	12
2.1 HISTORIE.....	12
2.2 VÝROBA.....	13
2.3 VLASTNOSTI.....	13
2.4 HOMOPOLYMER A KOPOLYMER.....	14
2.5 POUŽITÍ.....	15
2.6 STRUKTURA.....	15
2.7 ZPRACOVÁNÍ POLYBUTENU-1.....	17
3 ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ POLYMERŮ	18
3.1 ZKOUŠKA RÁZOVÉ HOUŽEVNATOSTI METODOU CHARPY.....	18
3.2 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ NAMĚŘENÁ DATA.....	23
3.2.1 Výroba.....	23
3.2.2 Teplota a vzdušná vlhkost.....	23
3.2.3 Stáří vzorku a podmínky skladování.....	24
3.2.4 Metodika měření, lidský faktor.....	25
3.2.5 Anizotropie.....	25
3.3 LOMOVÁ HOUŽEVNATOST A ŠÍŘENÍ TRHLIN.....	25
3.4 STATISTICKÉ VYHODNOCOVÁNÍ VÝSLEDKŮ ZKOUŠKY.....	28
II PRAKTICKÁ ČÁST	29
4 CÍL PRÁCE	30
5 TESTOVANÉ MATERIÁLY	32
5.1 PB 0110M.....	32
5.2 PB 8640M.....	32
6 PŘÍPRAVA VZORKŮ	34
6.1 VSTŘIKOVÁNÍ VZORKŮ.....	34
6.2 VRUBOVÁNÍ VZORKŮ.....	36
6.2.1 Zkušební vzorek.....	37
6.3 KONDICIONACE VZORKŮ.....	38
7 ZKOUŠENÍ RÁZOVÉ HOUŽEVNATOSTI	39
7.1 POUŽITÉ ZAŘÍZENÍ.....	39
7.2 NAMĚŘENÉ HODNOTY.....	40

7.2.1	Hodnoty měření 1	42
7.2.2	Hodnoty měření 2	43
7.2.3	Hodnoty měření 3	44
7.2.4	Hodnoty měření 4	45
7.2.5	Hodnoty měření 5	46
7.3	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ RÁZOVÉ HOUŽEVNATOSTI	47
7.3.1	PB 0110 M	47
7.3.2	PB 8640M	49
8	DISKUZE VÝSLEDKŮ	51
	ZÁVĚR	52
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	53
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	55
	SEZNAM OBRÁZKŮ	57
	SEZNAM TABULEK.....	58

ÚVOD

Od druhé poloviny 20. století až po současnost polymerní materiály, plasty, postupně pronikaly do všech odvětví a oborů lidské činnosti. Svou pozici si získaly zejména jednoduchostí zpracování, a to jak energetickou, tak časovou, dále chemickou stabilitou a mechanickou odolností. Od nejrůznějších výrobků denní potřeby až po přední vědecké obory s nimi dnes a denně přicházíme do styku. S tím ale souběžně přicházejí nároky na přesné vlastnosti od fyzikálně-mechanických, až po chemické. Tato práce se soustředí zejména na mechanické vlastnosti, a sice na rázovou houževnatost materiálu čili schopnost odolat působení síly rázem. Zvolený materiál, polybuten-1, spadající pod polyolefiny do skupiny termoplastů, které se vyznačují jednoduchostí zpracování, zejména jednoduchému tváření teplem, díky čemuž se v praxi řadí do skupiny levných polymerů.

Pro měření a ověřování vlastností materiálu na poli rázové houževnatosti jsou k dispozici dvě hlavní metody, Charpy a Izod. Obě zmíněné metody poskytují důležité údaje o vlastnostech materiálu, které jsou nezbytné pro určení jeho aplikace a využití v praxi. Praktické využití s sebou však nese spolu s mechanickým zatížením také jiné proměnné, jako je teplota a postupné stárnutí materiálu a jeho následné degradace. Proto je potřeba materiály zkoušet za různých podmínek, aby bylo jasně definováno jejich chování při různých podmínkách. Cílem této práce je nastavení vhodných podmínek měření jak transformovaného, tak netransformovaného polybutenu-1 při jednotných podmínkách zkoušky

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 POLYMERY

Základním částí všech plastových a elastomerních materiálů je polymer. Polymery jsou makromolekulární látky, složené z řetězce jednotlivých monomerů spojených k sobě chemickými vazbami. Tyto opakující se monomery v řetězci můžeme nazývat zkráceně merem. Polymerní materiály se dají dělit podle více faktorů. První klíč pro rozdělení polymerů je podle vzniku. První polymerní materiály byly přírodního původu, kdy v průběhu 19. století byly popsány a prozkoumány jak přírodního plastu, tak přírodního kaučuku. Postupem času však člověk potřeboval kvalitnější materiály s mnohem specifitějšími vlastnostmi. Proto v průběhu 20. let vědci usilovně zkoumali a vyvíjeli stále nové a nové syntetické polymerní látky, vyráběné primárně z frakcí ropy. S postupnou rostoucí kvalitou výrobků a snižování nákladů na výrobu tak polymerní materiály začaly nahrazovat jiné materiály ve všech odvětvích lidské produkce. [2,9]

1.1 Polyolefiny

Polyolefiny jsou polymerní látky syntetizované z olefinového monomeru, které jsou jednou z nejvýznamnějších skupin termoplastů. Dva nejvýznamnější materiály ze skupiny polyolefinů, polyetylen a polypropylen jsou světově nejpoužívanější termoplasty při výrobě nejrůznějších plastových výrobků. Od roku 1930, kdy byl poprvé syntetizován nízkohustotní polyetylen, přes léta 50., kdy byl úspěšně syntetizován vysokohustotní polyethylen a další izotaktické polyolefiny, až po metalocenové syndiotaktické polyolefiny a cyklopolyolefiny syntetizované na sklonku 20. století. Společně s výzkumem izotaktického polypropylenu týmem vedeným Giuliem Nattou také probíhal výzkum polymerace butenu-1, což předcházelo následné výrobě izotaktického polybutenu-1 [30]

2 POLYBUTEN-1

Materiál polybuten-1 spadá do skupiny polyolefinů, která se řadí pod termoplasty, který je svými vlastnostmi v mnohém podobný dalším polyolefinům, kterými jsou například polyethylen a polypropylen, kdy však nabízí spousty užitečných vlastností, které nejsou s polyolefiny běžně spojované. Polybuten-1 má poměrně vysokou houževnatost, kdy si i při malých tloušťkách stěn dokáže zachovat vysoký modul pružnosti. Také velmi dobře odolává dlouhodobým deformacím a degradacím materiálu, například korozi pod napětím a krípu, což je pomalá deformace tělesa vyvolaná konstantním mechanickým napětím působícím na těleso. Možností zpracování polybutenu-1 je více, stejně jako většiny dalších polymerů se nejčastěji používá metoda vstřikování, vyfukování a vytlačování. Využití polybutenu-1 je díky jeho vlastnostem široké, počínaje tenkostěnnými výrobky, například pytle a fólie, až po trubky a další vytlačované profily. [1]

2.1 Historie

Počátky výroby PB-1 spadají do 50. let minulého století. Poprvé byl syntetizován v Německu týmem profesora Natty roku 1954 za využití polymerace 1-buttenu. Tým využil specifické iniciátory, čímž vznikl vysoce izotaktický a semikrystalický polymer. Do první průmyslové výroby se pak materiál dostal roku 1960 v Německu, kdy jej pod označením Vestolen BT začala vyrábět firma Huls. [2]

Ve stejném období se výroba začala rozjíždět i ve Spojených Státech, kde polybuten-1 vyráběla firma Mobil Oil. Tato firma byla později odkoupena firmou Shell Chemicals, která výrobu materiálu polybuten-1 převedla pod svojí dceřinou firmu JV Montell. Firma Montel se poté na přelomu tisíciletí spojila s dalšími petrochemickými společnostmi, čímž vznikla společnost Bassel Polyolefines. Firma je na trhu dodnes a mimo jiné dodala surový materiál, který bude využit v experimentu této práce.[2]

2.2 Výroba

Hlavní surovinou pro výrobu polybutenu-1 je 1-buten, který je vedlejším produktem při zpracování katalytickým nebo tepelným štěpením ropy. Polymerace zde probíhá za pomoci Ziegler-Nattových stereospecifických katalyzátorů, čímž vzniká převážně izotaktický polybuten-1. [4]

2.3 Vlastnosti

Polybuten-1 je vysoce krystalický termoplastický vinylový olefin, který se vyskytuje celkem až v pěti různých modifikacích. Díky své vysoké molekulové hmotnosti, která se pohybuje v rozmezí M_w 770 000- 3 000 000. Vlivem vysoké molekulové hmotnosti a krystalické fáze, která dosahuje 55ti %, polybuten-1 velmi dobře odolává tečení materiálu a vznikání prasklin a trhlin. PB-1 také velmi dobře zachovává pružnost i při nízkých teplotách, má vysokou rozměrovou stálost a má poměrně dlouhou životnost. Izotaktický polybuten-1 také velmi dobře odolává vysokým teplotám a působením různých chemikálií. V Tabulce 1. jsou uvedeny základní fyzikální a mechanické vlastnosti a struktura polybutenu-1 [3,5,6]

Tab. 1. Struktura a vlastnosti polybutenu-1 [4]

Krystalinita:	47–58 % fáze I, 38 % fáze II
Typy mřížek:	hexagonální, tetragonální, ortorombická
Teplota tání fáze:	113-135 °C
Teplota rozpadu:	300-440 °C
Teplota skelného přechodu:	-20,5°C
Modul pružnosti:	150-295 MPa
Mez Kluzu:	12-15 MPa
Mez Pevnosti	290-295 MPa
Tažnost	200-400%
Modul pevnosti v ohybu	250-450 MPa

2.4 Homopolymer a Kopolymer

Homopolymerem se rozumí polymerní látka, jejíž makromolekulární řetězce jsou tvořeny pouze jedním typem meru. Tyto řetězce můžeme naznačit, kdy A označuje mer, jako řetězce AAAAAAAAAA čili neustále se opakující pouze jeden mer. Jde například o polystyren, polybutadien či polyetylen.[2]

Kopolymer naopak vzniká spojením jednoho či více monomerů do stejného polymerního řetězce. Monomery jsou zde výjimečně symetrické, molekulární uspořádání je stejné nezávisle na aktuálně sledované část monomeru. Vlivem alespoň dvou neustále se opakujících monomerních jednotek v kopolymeru můžeme kopolymery dělit podle uspořádání jednotlivých monomerů v řetězci. Základní rozdělení kopolymerů: [9]

- Střídané kopolymery
- Random kopolymery (statistické kopolymery)
- Blokované kopolymery
- Roubované kopolymery

Pokud jsou dva monomery v řetězci uspořádané střídavě, kopolymer označujeme jako střídavý [9]



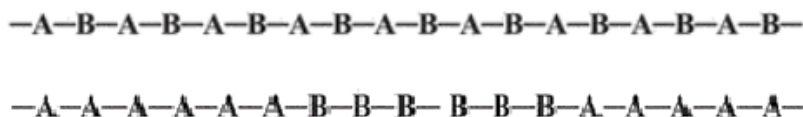
Obr. 1. Schéma střídavého kopolymeru [9]

V případě, kdy dva monomery v řetězci jsou uspořádány zcela náhodně, bez zjevného systému cyklického opakování, hovoříme o random kopolymeru [9]



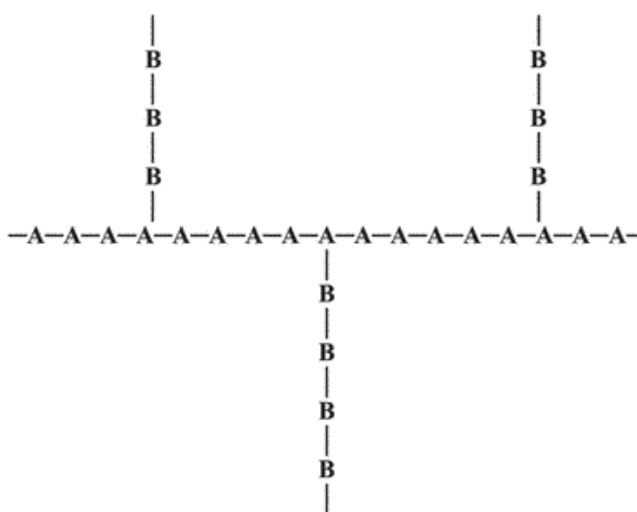
Obr. 2. Schéma random kopolymeru [9]

V případě blokovaných kopolymerů jsou jednotlivé druhy monomerů semknuté ve skupinách k sobě. Blokované kopolymery se můžou jevit jako dva homopolymery spojené konci k sobě. Za blokované kopolymery můžeme považovat také kopolymery, které obsahují několik seskupení stejných monomerů [9]



Obr. 3. Schémata blokových kopolymerů [9]

Jako roubované kopolymeru označujeme kopolymeru, jejich řetězce sestávají z polymerního řetězce jednoho polymeru, na který jsou připojeny, schematicky ze stran polymerní řetězce dalších polymerů. [9]



Obr. 4. Schéma roubovaného kopolymeru [9]

2.5 Použití

Tento materiál našel širokého využití i v potravinářském průmyslu. Je využíván k výrobě jednorázových plastových obalů, nebo jako zpomalovač tuhnutí u tavných lepidel, kdy prodlužuje dobu tuhnutí lepidla, zlepšuje jeho tepelnou stabilitu a viskozitu. [9]

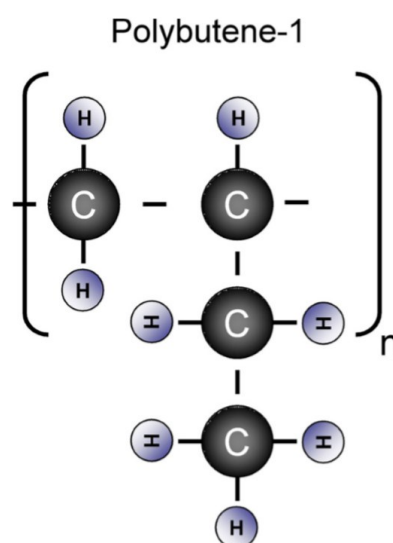
2.6 Struktura

Polybutylen-1 se může krystalizovat do celkem čtyř struktur, kdy každá struktura má trochu jiné chemické složení. Tento jev se vyskytuje u více polymerů, například u polyethylenu a polypropylenu. Vlastnost, kterou se izotaktický polybutylen-1 odlišuje od ostatních polymorfních materiálů je jednoduchost získávání různých modifikací v jejich čisté formě. Díky tomu je polymorfismus izotaktického polybutenu-1 předmětem několika studií, a to jak domácích, tak zahraničních. Tabulka 2 popisuje krystalickou mřížku, obecné hodnoty hustoty a teploty tání pro 4 hlavní fáze polybutenu-1.[5,7]

Tab. 2. Krystalická mřížka, teploty tání a hustoty fází PB-1[7]

Fáze:	Mřížka:	Teplota tání: [°C]	Hustota: [g/cm ³]
I	hexagonální	121-130	0,915
II	Tetragonální	100-120	0,900
III	Ortorombická	96-100	0,897
I'	Hexagonální	95-100	0,920

Polybuten-1 tedy má celkem 4 fáze. Fáze I a I' jsou stabilní formy, zatímco fáze II a III jsou metastabilními formami. Polymery obecně však nikdy nedosáhnou čisté krystalické fáze, vždy je zde obsažená jistá část fáze amorfní. Během tuhnutí do pevné fáze z taveniny polybuten-1 primárně krystalizuje do tetragonální fáze II. Poté se nechává odležet po dobu přibližně jednoho týdne, kdy materiál projde krystalickou fázovou transformací pro získání stabilní fáze I. Přejedem fáze II do fáze I. polybutylen-1 zvýší svou hustotu, díky smrštění během transformace, které je přibližně 2 % a získává lepší vlastnosti pro využití, než fáze II. Dojde například ke zvýšení teploty tání, tvrdosti a tuhosti materiálu, zatímco jsou zachovány jedinečné elongační vlastnosti. Jakmile je proces transformace do fáze I dokončen, získává PB-1 nejlepší mechanické vlastnosti. [5,7]



Obr. 5. Struktura Polybutenu-1[11]

Rychlost, kterou probíhá transformace mezi fázemi zde ovlivňuje několik faktorů. Záleží zde na například teplotě prostředí, kdy optimální je pokojová teplota, přibližně 23°C. Zvýšení či snížení teploty proces prodlužuje. Dalším ovlivňujícím faktorem je okolní tlak. Pokud tedy použijeme pokojovou teplotu a tlak standardizované atmosféry (1013.25Hpa), bude transformace trvat přibližně týden až 10 dní. Pokud se však zvýší tlak, můžeme při aplikaci 2000 bar transformaci dokončit během přibližně 10-ti minut. [7]

2.7 Zpracování Polybutenu-1

Polybuten-1 je běžně jako průmyslově zpracovaný polymer k dispozici ve formě granulí, prášku nebo vloček, které jsou následně zpracovatelné běžně dostupnými technologiemi využívanými pro zpracování dalších polyolefinů a termoplastů. Velkou výhodou při jejich zpracování je možnost zpracování teplem, kdy však termoplasty nijak neztrácí své chemické vlastnosti, protože i po zahřátí v nich neprobíhá žádná chemická reakce. Oproti tomu je třeba výrobky z termoplastů po tváření ochlazovat, jelikož by se při následné manipulaci deformovaly. Při odformování výrobku je třeba také počítat s další jeho vlastností, smrštěním. Smrštěním se rozumí snižování objemu při chladnutí taveniny do tuhého stavu. Toto smrštění obvykle nepřesahuje 0,5 %, v případě větších dílů je však třeba s ním počítat, takže například u vstřikování je nutné dutinu vstřikovací formy zvětšit o hodnotu smrštění daného termoplastu. Větší pozornost bude v této práci věnována právě technologii vstřikování, jelikož budou touto technologií připravena zkušební tělesa pro zkoumaný experiment. [1, 2, 8]

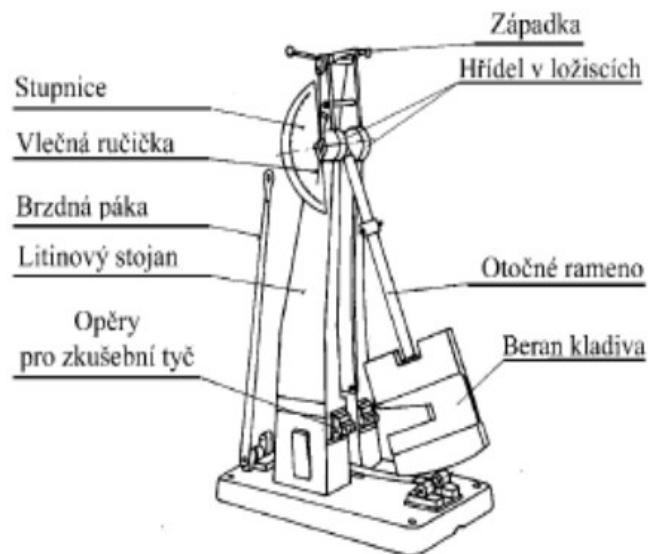
3 ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ POLYMERŮ

Mechanické vlastnosti materiálu jsou nejdůležitějším parametrem při výběru správného materiálu pro konstrukci výrobku. Teoreticky všechny aplikace polymerních materiálů zaujmají některý z typů mechanického namáhání, jakými jsou například tah, tlak, krut, stříh, ohyb a jejich kombinace. Pro přesné změření a definování chování materiálu vznikly mechanické zkoušky, které nám dávají konkrétní informace o mechanických vlastnostech materiálu a jeho odolnosti. [10]

3.1 ZKOUŠKA RÁZOVÉ HOUŽEVNATOSTI METODOU CHARPY

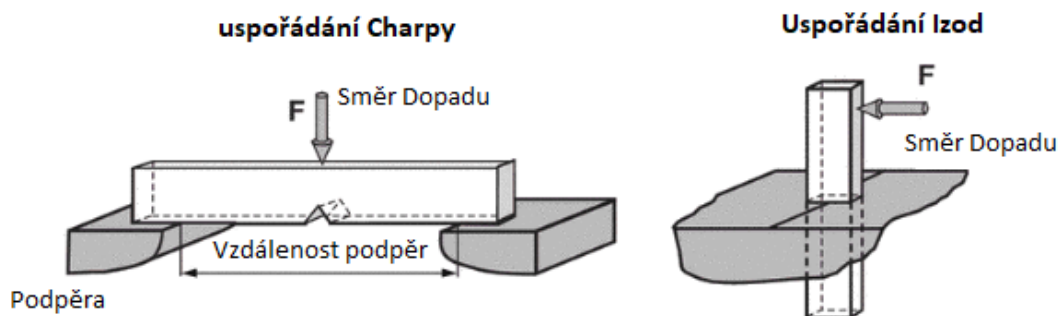
Zkoušení rázové houževnatosti metodou Charpy je jednou z nejpoužívanějších metod při kontrole kvality plastů. Zasloužila se o to především metodická jednoduchost testu, což zkoušku výrazně urychluje. Její praktické využití je však omezeno jen na vývoj a optimalizaci materiálů. [11]

Charpyho metoda pro měření využívá Charpyho kladivo, jehož základním principem je kyvadlo, na kterém je připevněna čepel, která přeráží testovaný vzorek. Charpyho kladivo ve své nejjednodušší podobě sestává z litinového stojanu, na který je pomocí hřídele v ložiskách připevněno otočné rameno. Na druhém konci otočného ramene je připevněn beran kladiva, který obsahuje čepel. Hodnoty měření na stupnici ukazuje vlečná ručička, která je při pohybu otočného ramene unášena unašečem, připevněným k hřídeli závěsu ramene. Pro získání co nejpřesnějších výsledků je nezbytné, aby se těleso při zkoušce zcela zlomilo. [11,12]



Obr.6. Schéma Charpyho kladiva [12]

Zkouška rázové houževnatosti může být provedena dvěma způsoby, podle konfigurace uložení zkušebního tělesa vůči kyvadlu. Zkušební těleso může být upnuto horizontálně, s podporou na obou koncích (Charpyho uspořádání), nebo být na jedné straně pevně upnuto vertikálně (uspořádání Izod). [11]



Obr.7. uložení vzorků a směr rázového zatížení [11]

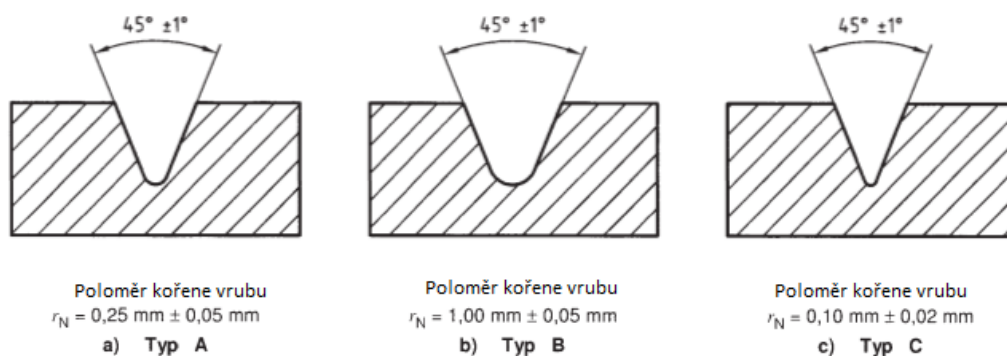
Testování metodou Charpy se provádí na tělesech s vrubem, respektive na nevrubovaných tělesech uložených ve třech bodech. Tato metoda slouží k vyhodnocení chování materiálu při rázovém zatížení. Její přesné parametry jsou popsány normou ISO 179. Tato norma mimo jiné definuje přesné rozměry zkušebních těles pro jednotlivé typy polymerů. Vzorky typu 1 jsou nejčastěji používány pro termoplasty, zatímco typy 2 a 3 jsou používány pro kompozitní materiály vykazující mezilaminární smykové lomy, například polymery vyztužené vlákny. [11]

Tab. 3. typy zkušebních těles, rozměry a vzdálenosti podpěr podle normy ISO 179[11]

	Délka l (mm)	Šířka b (mm)	Výška h (mm)	Vzdálenost podpěr L (mm)
Typ 1	80 ± 2	10 ± 0.2	4 ± 0.2	62
Typ 2	25 h	10 nebo 15	3	20 h
Typ 3	(11 nebo 13) h	10 nebo 5	3	(6 až 8) h

V případě vrubové zkoušky je do tělesa vyříznut vrub ve tvaru U nebo V. Tímto vrubem dosáhneme lepšího namáhání v linii řezu. Tímto způsobem lze dosáhnout přeražení zkušebního tělesa i na houževnatých materiálech, které nelze za běžných podmínek zlomit v podobě nevrubovaných vzorků. Vrub musí být vyříznut na straně tělesa namáhané na tah. [11]

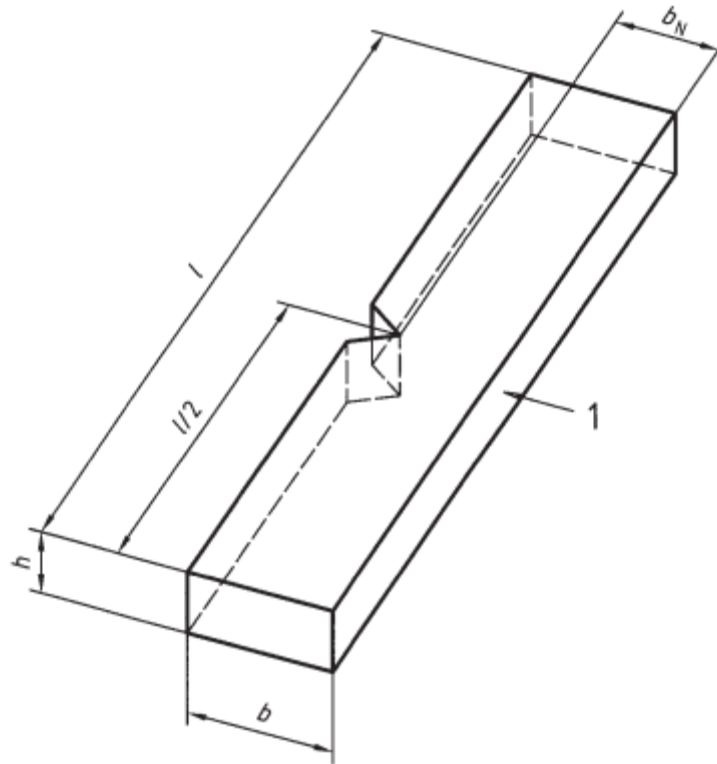
Vrubování testovacích vzorků rozlišuje tři základní typy vrubu. Pokud je dáno vlastnostmi materiálu, vrub může být na tělese vytvořen při jeho formování během výroby. Vrub je vždy nutné umístit do středu zkušebního tělesa. Nejčastějším typem vrubu je vrub typu A. K vrubování tělesa slouží vrubovací nože, upnuté do vrubovacího zařízení tak, aby bylo dosaženo co největší přesnosti hloubky vrubu. [15]



Obr. 8. Typy vrubů [15]

V případě zkoušky metodou Charpy máme více možností pro uložení tělesa. Nejpoužívanější je uložení typu Charpy edgewise, kdy těleso je vůči směru působení kyvadla vystaveno užší stranou, na kterou může být vytvořen vrub. Druhý případ, Charpy flatwise popisuje uložení zkušebního tělesa širší stranou vůči směru působení kyvadla. Toto těleso

pak nelze opatřit vrubem. Ve specifických případech lze tělesa skládat na sebe pro oba směry uložení, ve smyslu vůči kyvadlu. [15]



Obr. 9. Uložení zkušební tělesa podle Charpy edgewise [15]

1 - směr působení kladiva, l – délka zkušební tělesa, b_n – tloušťka zkušební tělesa pod vrubem, b – tloušťka zkušební tělesa, h – šířka zkušební tělesa [15]

Výpočetní podstata měření spočívá v energii W , kterou zkušební těleso absorbuje. Tu můžeme spočítat z rozdílu mezi potenciální energií kladiva ve výchozí poloze a potenciální energií kyvadla v maximální výchylce opačnou stranou po kontaktu se vzorkem. [11]

$$W = W_1 - W_2 = m \cdot g (h_1 - h_2) = m \cdot g \cdot l (\cos\beta - \cos\alpha)$$

(1)

Pro výpočet energie absorbované zkušebním tělesem se v praxi využívají dva vzorce. Volba vzorce závisí na přítomnosti vrubu na zkušebním tělese [15]

Pro výpočet energie spotřebované přeražením zkušebního tělesa bez vrubu vztažené na průřez tělesa [15]

$$A_{cU} = \frac{E_c}{b \cdot h} \times 10^3 \text{ [J/m}^2\text{]}$$

(2)

- E_c – energie pohlcená tělesem [J]
- h – šířka tělesa [mm]
- b – tloušťka tělesa [mm]

Pro výpočet energie spotřebované přeražením zkušebního tělesa s vrubem vztažené na průřez tělesa [15]

$$A_{cN} = \frac{E_c}{b_N \cdot h} \times 10^3 \text{ [J/m}^2\text{]}$$

(3)

- E_c – energie pohlcená tělesem [J]
- h – šířka tělesa [mm]
- b_N – tloušťka tělesa pod vrubem [mm]

Při zkoušení materiálů určených k tváření může dojít ke čtyřem druhům přeražení: [15]

- úplnému přeražení, kdy je zkouškou těleso rozděleno na více částí
- kloubovému přeražení, kdy je těleso po zkoušce drženo pohromadě pouze tenkou ohebnou vrstvou na povrchu opačném vůči směru působení kladiva
- částečné přeražení, kdy šířka trhliny v tělese nedosahuje většiny tloušťky tělesa
- Nepřeraženo, kdy těleso je pouze deformováno ohybem, ale nedochází k prasklině, případně je protlačeno mezi podpěrami

3.2 Faktory ovlivňující naměřená data

Důvodů pro odchylku při měření existuje několik důvodů, které mohly vzniknout v průběhu celého procesu zpracování zkušební tělesa, od jeho výroby až po samotné testování. K největší změně vlastností materiálu a následného tělesa dochází při výrobě, popřípadě jeho mechanického zpracování při tvoření požadovaného zkušební tělesa. [13]

3.2.1 Výroba

Při výrobě zkušební tělesa může zejména u vstřikování při nesprávném nastavení parametrů procesu nastat hned několik odchylek od požadované jakosti materiálu. Případné přidání plniv, aditiv a modifikátorů může tvořit s původním materiálem nehomogenní směs, čímž při zpracování směsi může docházet k degradaci a kontaminaci vzorku. Důležité je také nastavení parametru teplot vstřikování, při volbě nesprávných hodnot může být vzorek deformován, či obsahovat vnitřní napětí. Pokud jsou zkušební vzorky vyřezány, můžou za rozměrovými úchytkami stát nedokonalosti řezného nástroje, nedokonalosti při řezání samotném či rychlost řezání. Odchytky v rozměrech tělesa zkreslují výsledky následných zkoušek a jejich vyhodnocení, zejména pokud rozměry nejsou zahrnuty ve výpočtech naměřených hodnot. Tyto skutečnosti se v praxi poměrně těžko odhalují, většinou však stojí za následnými odchylkami v naměřených datech. [13]

Další faktory, které mohou ovlivnit naměřená data jsou: [13]

- Teplota a vzdušná vlhkost, při nichž zkouška probíhá
- Stáří testovaných vzorků a podmínky jejich skladování
- Použité zařízení a metoda, lidský faktor při měření

3.2.2 Teplota a vzdušná vlhkost

Teplota může ovlivňovat materiál dvěma hlavními způsoby. Jedna z možností, jak působení různých teplot může ovlivnit materiál, respektive zkušební vzorek, je změnou jeho rozměrových vlastností, částečně poblíž teploty skelného přechodu T_g nebo při dosažení teploty tání krystalů T_m . Druhá z možností ovlivnění vzorku teplem je rozklad materiálu za vlivem teploty, především zvýšené. Teplota skelného přechodu T_g je přechodová teplota materiálu mezi tuhou fází, která připomíná sklo a relativně měkkou fází, kdy je materiál jednoduše tvarově deformovatelný. Rozměrová nestálost výrobku vlivem působení tepla je rozdílná pro jednotlivé typy plastových materiálů, lepší odolnost v tomto směru vykazují

materiály s vyšší molekulární hmotností, případně materiály zesíťované. Další možností zvýšení odolnosti vůči teplotě je přidání plniv. Plniva složí jako upravující přídavek do materiálu, zabraňující nejen tepelným změnám v materiálu výrobku. Odolnost vůči působení tepla nebo oxidaci vlivem vystavení vzduchu lze dosáhnout přidavkem těchto stabilizačních plniv a antioxidantů. [13]

3.2.3 Stáří vzorku a podmínky skladování

Obecně vzato zkušební vzorky nesmí být během skladování vystavené namáhání jakéhokoliv druhu, musí být udržovány pod konstantní teplotou popsanou níže a okolní relativní vzdušná vlhkost musí být udržena v mezích odpovídající skupiny. Podmínky skladování a stáří vzorku upravuje norma ČSN EN ISO 291. Jde o normu popisující skladování a přípravu vzorků, jejich kondicionování, a zkoušení všech zkušebních těles pro všechny plastové materiály při konstantních atmosférických podmínkách, které po stránce teplotní, vlhkostní, tlakové odpovídají průměrným podmínkám v laboratoři. Například zkušební klimata jsou rozdělena do skupin podle geografického rozdělení. Pro Evropu jsou definována dvě hlavní klimata [13]

- A1 – Definováno teplotou 20 ± 2 °C, relativní vzdušnou vlhkostí $65 \% \pm 5\%$
- B1 – Definováno teplotou 20 ± 2 °C, relativní vzdušná vlhkost není definována

Další definovaná klimata pro oblasti Severní Ameriky a tropických či subtropických regionů se liší zejména teplotou. Pro oblast Severní Ameriky jsou to zkušební klimata: [13]

- A2 – Definováno teplotou 23 ± 2 °C, relativní vzdušná vlhkost $50 \pm 5\%$
- B2 – Definováno teplotou 23 ± 2 °C, relativní vzdušná vlhkost není definována

A pro tropické a subtropické oblasti: [13]

- A3 – Definováno teplotou 27 ± 2 °C, relativní vzdušnou vlhkostí $65 \pm 5\%$
- B3 – Definováno teplotou 27 ± 2 °C, relativní vzdušná vlhkost není definována

Na první pohled je tedy jasné, že v případě použití parametrů měření, které vycházejí z měření v některé z Asijských zemí, bude dosaženo rozdílných výsledků, pokud nebude přihlédnuto ke klimatickým aspektům kondicionace materiálu před měřením. [13]

Pro vzorky polybutenu-1 je vzhledem k jeho transformacím a formám, při kterých dosahuje odlišných parametrů provádění zkoušky nejméně jeden týden po výrobě, ideálně pak 10 dní,

tak aby materiál transformoval do fáze-1, kdy získává své prakticky využitelné odolnosti vůči rázovému namáhání.[10]

3.2.4 Metodika měření, lidský faktor

Na příkladu měření rázové houževnatosti je patrné, že lze provést různá měření s cílem měřit stejnou vlastnost tělesa. Každá z uvedených metod je přesně definována náležitými normami, lze však pozorovat drobné změny ve stylu měření. Rozdíl měření například mezi metodou Charpy a Izod spočívá v rozdílném uložení tělesa a modifikacím hrotu kladiva, který přeráží zkušební vzorky. Je tedy vysoce pravděpodobné, že za předpokladu totožných zkušebních těles, budou výstupy hodnot odlišné. Další chyby měření vlivem metody je přirozená tolerance měřícího přístroje. Pokud by v praxi došlo k sečtení maximální úchylny při vrubování, následně přidání odchylky při měření rázové houževnatosti s výpočetními tolerancemi a zaokrouhleními, vzdaluje se naměřená a přepočtená hodnota od hodnoty skutečné. Hodnota odchylky měřidla může vznikat i opotřebením použitého zařízení, případně z pohledu lidského faktoru například nesprávnou kalibrací zařízení, nesprávným postupem zkoušky či nedodržením některých ze standardů kondicionace. [13,15]

3.2.5 Anizotropie

V případě, že zkušební těleso bylo vyřezáno z jiného tělesa, ať už jde o lisovanou či vstřikovanou desku, nebo třeba o lopatku, jejíž centrální část má stejné rozměry jako zkušební těleso typu 1, můžeme hovořit o anizotropii materiálu. Anizotropií rozumíme rozdílné vlastnosti stejného materiálu vlivem mechanického zpracování. Tento rozdíl v povrchu, případně po obvodu zkušebního tělesa může výrazným způsobem zkreslit výsledky, je proto nutné vzorky vyrobené přímo a vzorky vyrobené mechanickým zpracováním měřit samostatně a následně porovnat jejich výsledné hodnoty a chování v průběhu zkoušky. Vyřezávání zkušebních vzorků, postup a povolené způsoby provedení jsou upraveny normou. [15]

3.3 Lomová houževnatost a šíření trhlin

Teoreticky, při absenci jakýchkoliv nedostatků by materiál neměl prasknout za předpokladu, že namáhání a zatížení působící na materiál nepřekročí mez elasticity daného materiálu. V praxi je však nutné započítat výrobek jako celek, kdy výrobek může obsahovat různé geometrické prvky, jako díry, nebo různé chyby při výrobě a zpracování materiálu, což může vést ke koncentraci zatížení v těchto oblastech. Lom je předcházen prasklinou, která se

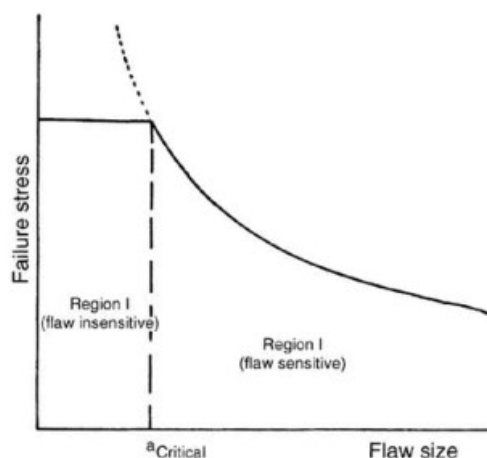
postupně šíří, dokud materiál nepraskne. Z našeho úhlu pohledu je důležité soustředit se na počátky šíření lomu právě z místa, kde dojde jako první k prasklinám. Tyto praskliny v materiálu vznikají následkem namáhání materiálu. Můžou být způsobeny vnějšími vlivy, jako například pracovní zatížení výrobku, nebo působením různých namáhání, ať už statických, nebo dynamických. V případě vnitřního namáhání materiálu můžeme hovořit o vnitřním pnutí materiálu vlivem nedokonalého zpracování materiálu, či správným designem výrobku.[13]

Požadavek na perfektní výrobek tedy neznamená, že materiál nikdy nesmí prasknout, ale že materiál by během plánované životnosti a pracovním zatížením výrobku, i za dosažení nejhorsích podmínek, měl být odolný vůči trhlinám a lomům [13]

3.3.1 Příčiny trhlin

Jednou z možných příčin tvorby trhlin je nesprávnou volbou materiálu. Lokální plastické deformace vlivem přílišného zatížení často můžou odstartovat mikroskopické trhliny, které se časem spojí do makroskopických trhlin, což předchází zlomům a trhlinám obecně. To podtrhuje důležitost správné volby materiálu, aby při jeho deformaci vlivem pracovního zatížení nedocházelo k prasklinám a následným selháním materiálu.[13]

Další z možných příčin tvorby trhlin je vada materiálu. Níže uvedený graf popisuje spojitost mezi velikostí tohoto kazu a namáháním, které je potřeba ke vzniku trhlin. Pokud vážnost těchto vad přesahuje kritickou hodnotu ($\alpha_{kritické}$)(Oblast II), jsou příčinou koncentrace namáhání, odkud se praskliny šíří dále materiálem, čímž snižují pevnost materiálu. Selhání výrobku se tak obvykle projevuje v okolí děr pro šrouby, čepy nebo nýty. [13]



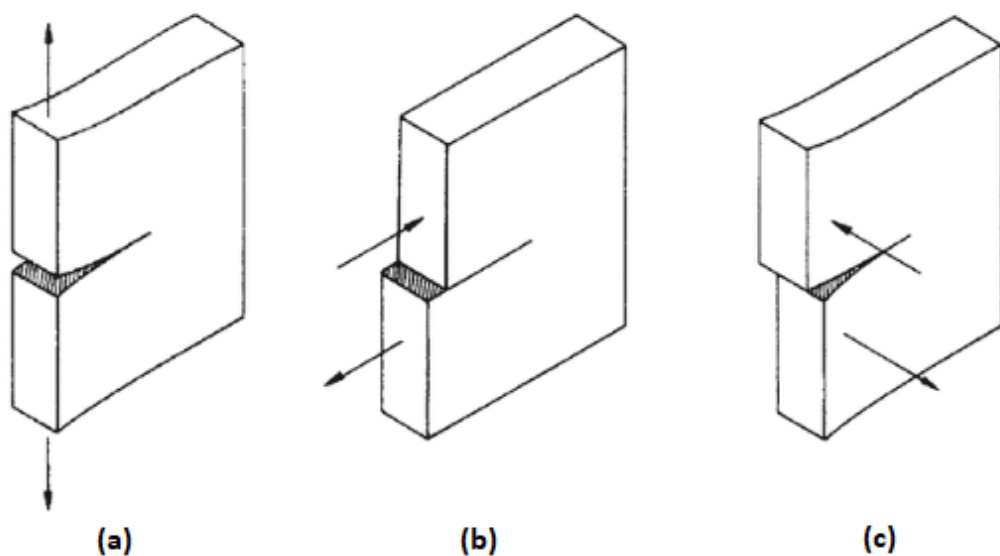
Obr. 10. Graf znázorňující závislost mezi vadou materiálu a kritickým zatížením materiálu

Důležitou hodnotou spojenou s trhlinami je kritické napětí (σ_c), kritická intenzita napětí, (K_c) lomová houževnatost a energie lomu vztažená na plochu, (G_c). Kritické napětí (σ_c) je namáhání, při kterém délka trhliny (a) začne růst, popsané podle vztahu: [13]

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2\gamma}{\pi a} \cdot \frac{E}{1 - \nu^2}}$$

(4)

E je modul, ν je Poissonova konstanta a γ je povrchové napětí materiálu. Z tohoto vztahu lze odvodit, že větší vady vedou k nižší houževnatosti. [13]



Obr. 11. Typy šíření trhlín [13]

a – růst trhliny je řízen tahovou složkou σ_y tenzoru napětí, b – růst trhliny je šířen smykovou složkou τ_{xy} tenzoru napětí, c – růst trhliny je řízen stříhovou složkou τ_{yz} tenzoru napětí. [13]

3.3.2 Křehký lom

V případě křehkého lomu hovoříme o nízkoenergetickém procesu. Pokud dojde k vzniku lomu vlivem nakumulované energie, není nutné dále dodávat energii, trhlina se bude materiálem nenávratně šířit. Největší nebezpečí takovýchto lomů je fakt, že obvykle nebývá předcházen žádnou viditelnou deformací, která by indikovala možnost vzniku křehkého lomu [13,14]

3.4 Statistické vyhodnocování výsledků zkoušky

Správné vyhodnocení statistických výsledků je stejně důležité jako správnost měření sama. Statistika je ve své podstatě analýza dat, kdy je pomocí statistických metod vyhodnocen soubor naměřených dat, která jsou následně prezentována ve srozumitelné podobě. Vzhledem k rozdílnosti naměřených dat, k čemu může dojít vlivem působení parametrů ovlivňující data, je základní statistika schopna určit hodnotu Průměru, kterou reprezentuje celý naměřený soubor hodnot a následně i hodnotu případné odchylky hodnot od průměru či jiného statisticko-matematického zpracování dat. Statistickým zpracováním naměřených dat se tedy rozumí jejich základní zpracování a zjednodušení, stejně jako schopnost zjištění trendu následujícího vývoje, v případě proměnných parametrů například změnami v kondicionaci zkušebních těles v případě zkoušky rázové houževnatosti. [10,18]

Úplným základem statistického vyhodnocení dat je aritmetický průměr z hodnot dat. Aritmetický průměr udává průměrnou hodnotu celého souboru dat, kdy jej lze vypočítat součtem všech hodnot v souboru vyděleným počtem hodnot v souboru. Výhodou využití aritmetického průměru je jeho snadný výpočet pro získání základního přehledu. Jeho nevýhodou je však lehká ovlivnitelnost v případě extrémní hodnoty v hodnoceném souboru. Vzorec pro výpočet aritmetického průměru x , kde $x_{(1,2,3...n)}$ označuje hodnotu ze souboru, n je celkový počet hodnot v měření: [10]

$$x = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} \quad (5)$$

Dalším důležitým faktorem pro vyhodnocení naměřených dat je určení jejich odchylky. Směrodatná odchylka je ve statistice využívána k vyhodnocení rozptylu hodnot vzhledem k průměrné hodnotě souboru. Pokud se směrodatná odchylka blíží 0, můžeme tvrdit, že všechny hodnoty z posuzovaného souboru hodnot jsou velice blízko jejich průměru. Směrodatnou odchylku lze vypočítat následujícím vzorcem, kde ΣX označuje součet všech hodnot v souboru a n je počtem hodnot v posuzovaném souboru hodnot. [18]

$$s = \sqrt{\frac{\left(\Sigma X - \frac{\Sigma X}{n}\right)^2}{n - 1}} \quad (6)$$

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 CÍL PRÁCE

Cílem této bakalářské práce je nalezení vhodných podmínek pro měření netransformovaných a transformovaných homopolymerů a kopolymerů polybutenu-1, vhodných teplot k provedení zkoušek rázové houževnatosti metodou Izod a Charpy podle příslušných norem ISO 179, respektive ISO 180. Vhodnou technologií budou připravena zkušební tělesa, která budou následně testována v různých transformačních fázích a různých teplotách, čímž určíme ideální teplotu pro měření rázové houževnatosti.

Teoretická část bakalářské práce popisuje základní vlastnosti použitého materiálu polybuten-1, popis jeho fázových transformací a rozdíly mezi homopolymerem a kopolymerem. Dále obsahuje rozbor metod využívaných ke změření rázové houževnatosti plastových materiálů, konkrétně metod Izod a Charpy. Je zde zařazen také popis faktorů, které mohou ovlivnit výsledná měření, od výrobních vad zkušebních vzorků až po nepřesnosti měřidel a klimatické podmínky

Praktická část sestává z popisu využitých technologií a přístrojů, použitých parametrů při výrobě a opracování zkušebních těles, včetně detailního popisu vlastností použitého homopolymeru a kopolymeru polybutenu-1. Následuje popis zařízení pro měření rázové houževnatosti a chladicího zařízení, jelikož testovací vzorky polybutenu-1 bylo nutno pro úspěšnost zkoušky testovat pod bodem mrazu. Po praktickém popisu průběhu měření následují tabulky obsahující naměřená data včetně základních statistik. Na závěr je uvedena diskuze výsledků, kde je diskutováno chování materiálu během měření a následné vyhodnocení a porovnání naměřených dat, včetně popisu příčin rozdílnosti hodnot

Pro dosažení reprodukovatelnosti měření bylo nutné zachovat totožný postup zkoušení, včetně volby stejných typů zkušebních těles, pracovních označených jako trámek a lopatka, kdy v případě lopatky bylo nutno zkušební těleso vyřezat odstraněním koncových oblastí.

Samotné měření sestávalo z několika důležitých kroků:

- Kondicionace těles, kdy tělesa byla nejdříve kondicionována za podmínek zkušebního klimata B1, následně ochlazena na teplotu zvolenou pro provedení zkoušky rázové houževnatosti.
- Do stroje pro měření rázové houževnatosti byly nastaveny parametry zkoušky, rozměry zkušebního tělesa a použité závaží na kladivu, instalace požadovaného typu podpěr a hlavy kladiva, závisujícího na provádění zkoušky metodou Izod nebo

Charpy. Po splnění výše uvedeného bylo kladivo zkalibrováno pro dosažení nejvyšší možné přesnosti měření

- Ochlazený vzorek byl ihned po vyjmutí z chladícího zařízení upnut do zkušebního stroje a přeražen zkušebním kladivem, přičemž byl vizuálně sledován průběh zkoušky, zda došlo k úplnému či jinému typu přeražení, nebo jestli těleso bylo přeraženo až při návratu kyvadla, případně nebylo přeraženo vůbec a bylo pouze nějak zdeformováno
- Následně při úspěšném provedení zkoušky byly zapsány naměřené hodnoty, energie spotřebovaná pro přeražení zkušebního vzorku a energie spotřebovaná pro přeražení zkušebního vzorku vztažená na jeho průřezové charakteristiky. Pro vytvoření statistiky bylo při každém měření vytvořit soubor hodnot s minimálně deseti hodnotami pro každý z materiálů.
- V případě úspěšnosti zkoušky při vysokých záporných teplotách bylo možno zkušební vzorky odzkoušet i za vyšších teplot.

5 TESTOVANÉ MATERIÁLY

Pro měření rázové houževnatosti byly zvoleny dva typy polybutenu-1, jeden homopolymer a jeden kopolymer, označené jako PB 0110M a PB 8640M. Oba materiály byly k dispozici ve formě granulátu, dodávaného firmou LyondellBassel Industries. Z hodnot v jejich materiálovém listu je patrný rozdíl mezi jejich indexem toku taveniny, který je v případě PB 8640M více než dvojnásobný při stejné teplotě taveniny a modulu pružnosti, který má pro PB 8640M hodnotu 250 MPa, zatímco u PB 0110M dosahuje hodnoty 450MPa. Hustotou jsou si tyto materiály podobné.

5.1 PB 0110M

PB 0110M je semikrystalický homopolymer, využívaný zejména u výrobků, kde je vyžadována vysoká odolnost proti trhlinám a odolnost proti vysokému rozpětí teplot. Je velice podobný polypropylenu díky podobnostem v molekulárních strukturách. Díky pomalé krystalizaci má vynikající navlhavé schopnosti. Tvoří dvoufázovou strukturu, díky čemu je využíván v jednorázových obalech. Doporučená teplota zpracování je v rozmezí 180°C až 260°C. Mechanické vlastnosti uvedené v tabulce 4 byly naměřeny po kondicionaci 10 dní při teplotě 23°C [16]

5.2 PB 8640M

PB 8640M je kopolymerem polybutenu-1 s nízkým obsahem ethylenu. Je zejména využíván jako příměs do materiálů, využívaných pro odtrhované obalové materiály. Typickou PE směsí s PB 8640M je kterýkoliv homopolymer nebo kopolymer etylénu, jehož index toku taveniny je v rozsahu 0,7 až 2,0 g/10min. Je zde podobnost v molekulární struktuře s polypropylenem, díky čemu může být využíván jako jeho příměs a upravovat jeho mechanické vlastnosti, například rázovou houževnatost. Doporučená teplota zpracování je 180°C až 260°C a mechanické vlastnosti uvedené v tabulce 5. jsou měřené na vzorcích kondicionovaných po dobu 10 dní při okolní teplotě 23°C. [17]

Tab. 4. Přehled základních materiálových vlastností PB 8640M a PB 0110M [16,17]

Vlastnost	PB 8640M	PB 0110M	Norma
Index toku taveniny [g/10min]	28	12	ISO 1133-1
Hustota [g/cm ³]	0,906	0,914	ISO 1183-1
Modul pružnosti [MPa]	250	450	ISO 178
Pevnost při přetržení [MPa]	30	35	ISO 8986-2
Dloužení při přetržení [%]	300	300	ISO 8986-2
Teplota tání pro fázi I [°C]	113	128	ISO 11357-3
Teplota tání pro fázi II [°C]	97	117	ISO 11357-3

6 PŘÍPRAVA VZORKŮ

Všechny vzorky použité pro měření v této práci byly připraveny metodou vstřikování. Tyto tělesa byly k dispozici ve dvou podobách, pracovně označené jako trámek a lopatka. Trámek má přímo požadované rozměry, zatímco lopatku bude nutno uříznout, protože bude potřeba jen prostřední část z jejího profilu. Následně bude nutné pro úspěšnou zkoušku rázové houževnatosti zkušební tělese opatřit vrubem.

6.1 Vstřikování vzorků

Byl použit dostupný vstřikovací stroj ergotech 50-200 od firmy DEMAG, do kterého byla upnuta forma pro odformování zkušebních těles.



Obr.12. Vstřikovací stroj DEMAG ergotech 50-200 system

Na vstřikovacím stroji byly po zapnutí nastavené hodnoty teplot pro všechny sekce stroje, přičemž se použité hodnoty nelišily u obou materiálů. Po kontrole stroje a nastavení všech nezbytných hodnot vstřikovacího cyklu byl nasypán materiál ve formě granulátu do násypky a bylo zahájeno vstřikování. Vzorky byly poté zkontrolovány na obsah nečistot a jiných nedokonalostí. Bylo vyrobeno celkem 100 vzorků každého materiálu.

Jak pro materiál PB 0110M, tak i pro PB 8640M bylo použito stejných parametrů pro vstřikovací cyklus vzhledem ke stejným teplotám zpracování. Pouze původní použitou hodnotu dotlaku 450 bar bylo nutno zvýšit na 550 bar, vzhledem k možné nedokonalosti výrobku.

Tab. 5. Hodnoty vstřikovacího cyklu

Parametr [jednotka]	hodnota
Teplota na vstupu [°C]	40
Teplota sekce I [°C]	150
Teplota sekce II [°C]	180
Teplota sekce III [°C]	195
Teplota trysky [°C]	210
Teplota taveniny [°C]	221
Teplota formy [°C]	30
Otáčky šneku [ot/min]	150
Dráha dávkování [mm]	54
Čas cyklu [s]	100
Čas zastavení lisu [s]	2
Čas chlazení [s]	40
Dotlak [bar]	550
Čas dotlaku [s]	15
Uzavírací síla [kN]	500
Vstřikovací tlak [bar]	1500

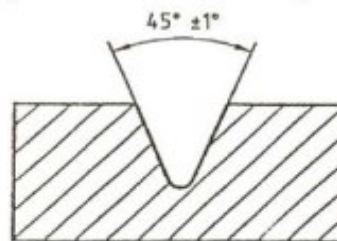
Vzorky byly po vstříknutí odděleny od zbytku výstřiku, byly zkontrolovány jejich rozměry a kvalita povrchu, také byly zkontrolovány na přítomnost nečistot.



Obr. 13. Testovací vzorky před oddělením od vtokové soustavy

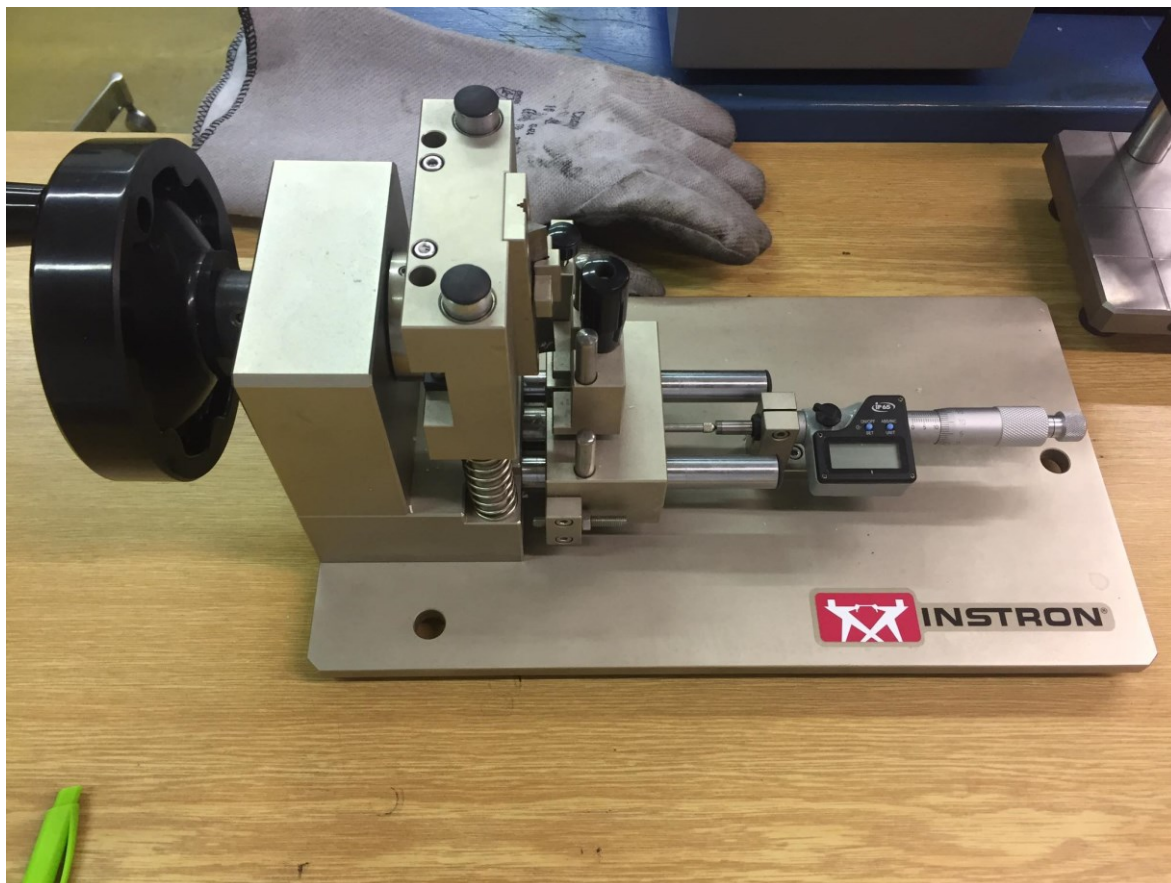
6.2 Vrubování vzorků

Na vzorcích byly následně ještě vytvořeny vruby na užší stranu, aby tělesa šla plně přerazit, což je nezbytné pro oba typy zkoušení, jak metodou Charpy, tak metodou Izod. Byl použit vrubovací nůž typu A, tudíž vrub měl parametry typu A. Vrub A definuje poloměr kořene vrubu $r_N = 0,25 \pm 0,05$ mm, při šířce tělesa pod vrubem $b_N = 8,0 \pm 0,2$ mm Hloubka vrubu byla posléze přeměřena na úchylkoměru pro dosažení co nejpřesnějších hodnot při vrubování. [26]



Poloměr kořene vrubu
 $r_N = 0,25 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$

Obr. 14. Vrub typu A [26]



Obr. 15. vrubovací zařízení s vrubovacím nožem typu A

6.2.1 Zkušební vzorek

Po opatření zkušební vzorku vrubem typu A vznikla finální podoba zkušební vzorku o rozměrech uvedených v tabulce 7.

Tab. 6. Rozměry použitého zkušební tělesa

Délka l [mm]	80 ± 2
Šířka h [mm]	4,08
Tloušťka b [mm]	10,35
Tloušťka v místě vrubu b_N [mm]	8,35

6.3 Kondicionace vzorků

Z důvodu transformace polybutenu-1 do fáze I bylo nezbytné vzorky 7 dní uskladnit. Všechny možnosti kondicionace plastových vzorků upravuje norma ČSN EN ISO 291. Uskladnění vzorků proběhlo vždy ve zkušebním klima B1, zkouška samotná pak probíhala podle testovaných hodnot při teplotách -40°C , -20°C a přímo v podmínkách definovaného klima B1. B1 je specifikováno pro oblast Evropy a teplotou $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ a nedefinované relativní vzdušné vlhkosti. Všechny zkoušky proběhly beze změny okolního tlaku, definovaného standardní atmosférou na 1013 hPa. Chlazení vzorků proběhlo na stroji CharpyCool Bath 480, kde jako chladicí médium byl použit ethanol. CharpyCool Bath dovoluje nastavit teplotu v rozpětí -80°C až $+30^{\circ}\text{C}$ při odchylce $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$.



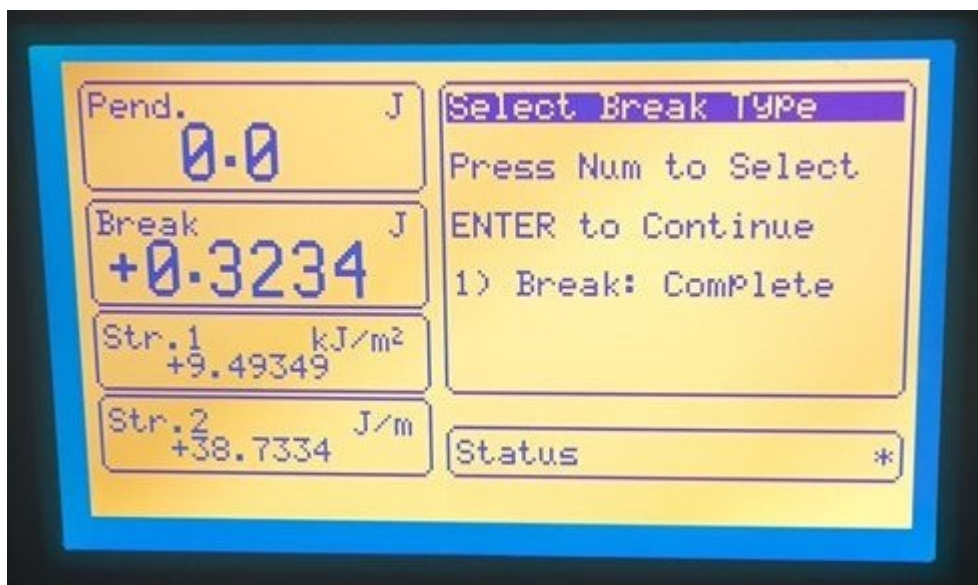
Obr. 16. Chladicí zařízení CharpyCool

7 ZKOUŠENÍ RÁZOVÉ HOUŽEVNATOSTI

Zkušební tělesa opatřena vrubem byla podrobena sérii měření, které probíhaly s odstupem vzhledem k průběhu fázové transformace polybutenu-1 do fáze I. Při měření bylo použito více teplot pro zkoušku, pro ověření ideální kombinace parametrů zkoušky. V případě chlazení těles pod bod mrazu bylo těleso vždy vyjmuto z chladicího zařízení a zkouška byla provedena neprodleně poté, aby se zamezilo tepelným změnám na tělese pro získání co nejpřesnějších výsledků.

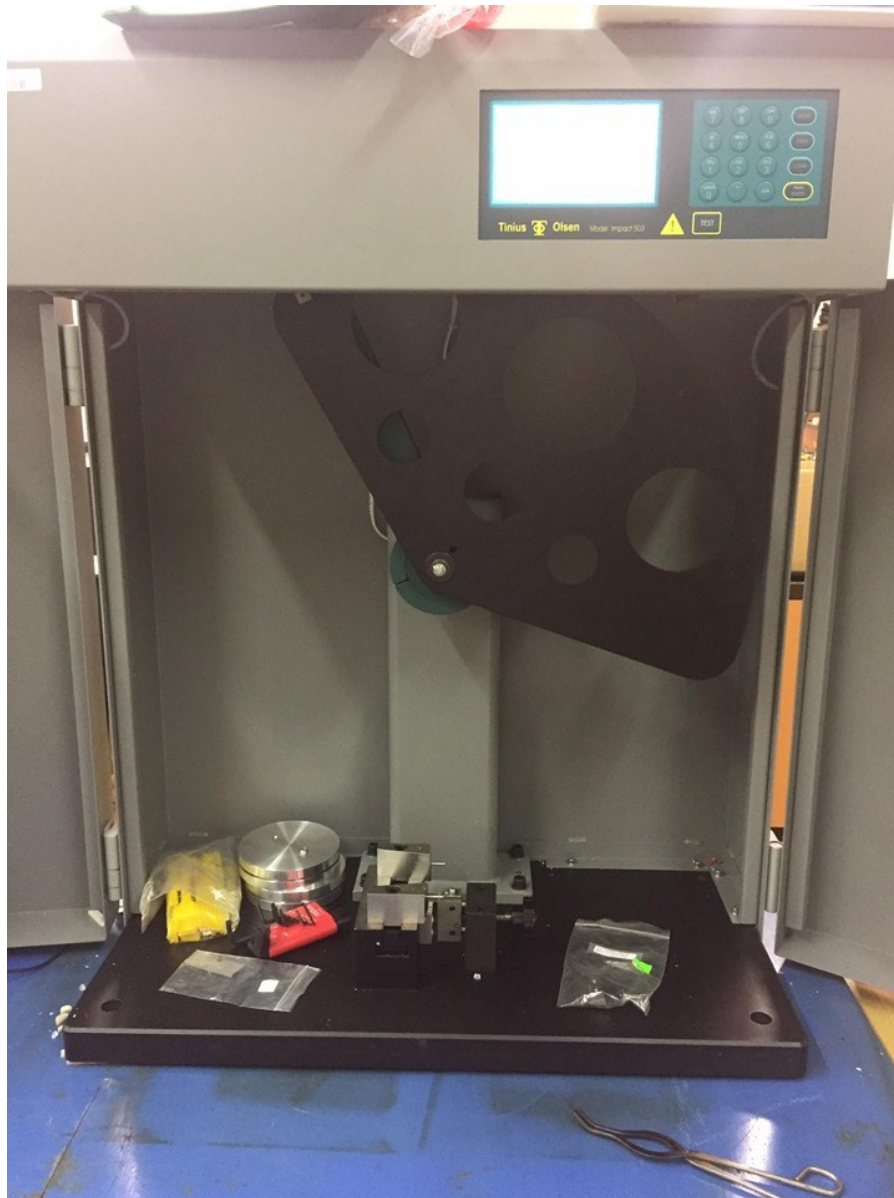
7.1 Použité zařízení

Měření rázové houževnatosti bylo prováděno na zařízení IT 503 od firmy Tinius Olsen. Toto zařízení, přímo navržené pro měření rázové houževnatosti pro plasty, zvládá měření jak metodou Charpy, tak metodou Izod, podle příslušných norem ČSN EN ISO 180, respektive ČSN EN ISO 179. Základní energie kyvadla je zde stanovena na 2,8 J, v praxi jí lze rychle měnit jednoduchým přidáváním závaží. Energie pohlcená lámáním tělesa je zobrazená na digitálním displayi, stejně tak jako možnost jejich dalších nastavení a přepočtů.



Obr. 17. optický výstup zařízení Tinius Olsen IT 503

Zařízení IT 503 je schopno kompletních výpočtů měřených hodnot, na základě hmotnosti závaží a zadaných parametrů zkušebního tělesa. Stroj je také pro praxi naprosto bezpečný, vzhledem k průhlednému krytu, který je vždy nutno zavřít, zařízení jinak nedovolí zahájit zkoušku. Kyvadlo je zde uvolňováno elektronicky. Výchozí úhel kyvadla byl nastaven na 145°.

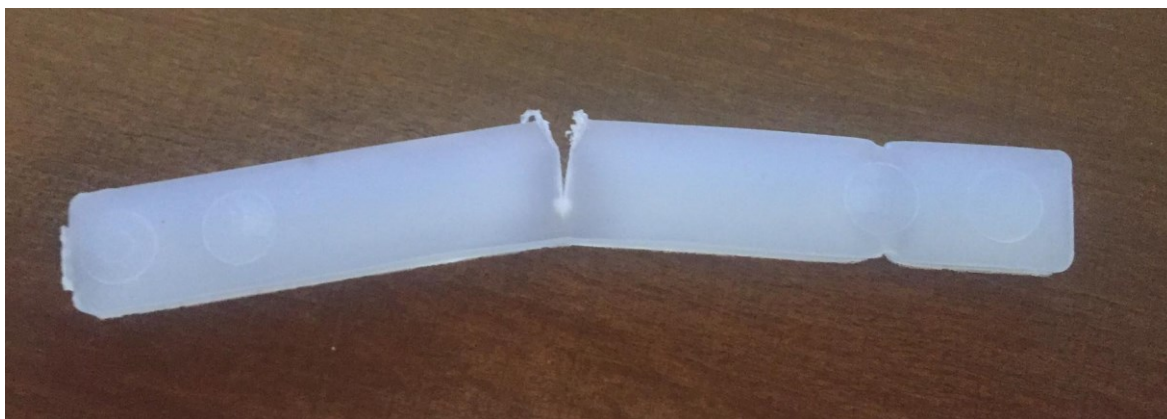


Obr. 18. Stroj IT 503. Kladiivo bez přidaných závaží v poloze připraveno, kryt přístroje otevřený

7.2 Naměřené hodnoty

Měření probíhaly v celkem čtyřech časových úsecích, vzhledem k stáří zkušebních vzorků po výrobě. První zkušební měření proběhlo 2 hodiny po výrobě těles pro zjištění chování homopolymeru i kopolymeru polybutenu-1 ve fázi II, do které polybuten-1 krystalizuje při přechodu z taveniny do pevné fáze, pro úplné přerážení byla tělesa ochlazená na teplotu $t = -40^{\circ}\text{C}$, aby bylo dosaženo úspěšné zkoušky úplným přerážením zkušebního vzorku. Pro toto měření bylo použito konfigurace metody Izod.

Měření číslo 3 předcházelo pokusné měření, jehož cílem bylo zjistit chování polybutenu-1 transformovaného do fáze I. Při měření s energií kladiva 2,8 J nebyly zkušební vzorky přeraženy, tudíž zkouška nebyla úspěšná. Následovalo zvýšení energie kladiva přidáním závaží na 7,6 J, kde opět jak pro homopolymer PB 0110M, tak kopolymer PB 8640M nedošlo k přeražení zkušebních vzorků testovacím kladivem metodou Izod. Na následujících obrázcích je jasně patrné šíření trhliny, kdy PB 8640M odolal lépe než zkušební tělísko vzorku PB 0110M.



Obr. 19. Šíření trhliny při neúspěšné zkoušce na vzorku PB 0110M



Obr. 20. Šíření trhliny při neúspěšné zkoušce na vzorku PB 8640M

V rámci druhého měření bylo pokusně odzkoušeno několik vzorků PB 0110M i PB 8640M bez vrubu. Z měření zkušebních těles bez vrubu je jasně patrný rozdíl oproti vrubovaným zkušebním tělesům. Nevrubovaná vykazují daleko větší odolnost, a tudíž naměřené hodnoty jsou několikanásobně vyšší jak pro energii spotřebovanou pro jeho přeražení W , tak pro energii spotřebovanou k jeho přeražení vztáženou k ploše jeho příčného průřezu A_n .

7.2.1 Hodnoty měření 1

Měření 1 proběhlo dvě hodiny po vyrobení tělesa, kdy zkušební tělesa byla ochlazená na zkušební teplotu $t = -40\text{ }^{\circ}\text{C}$, energie použitého kladiva byla 2,8 J a konfigurace zkoušky Izod. Při tomto měření byly použity tělesa pracovníčně označené jako trámek.

Tab. 7. Hodnoty 1. měření

Číslo měření	PB 0110M		PB 8640M	
	Energie W [J]	Energie A_{cN} [kJ/m ²]	Energie W [J]	Energie A_{cN} [kJ/m ²]
1.	0,1564	4,5909	0,1620	4,7552
2.	0,1886	5,5361	0,2436	7,1505
3.	0,1462	4,2915	0,1305	3,8306
4.	0,1568	4,6026	0,1381	4,0537
5.	0,1381	4,0537	0,1360	3,9921
6.	0,1724	5,0605	0,1261	3,6985
7.	0,1268	3,7220	0,2221	6,5194
8.	0,1551	4,5527	0,1339	3,9304
9.	0,1428	4,1917	0,1513	4,4412
10.	0,1453	4,2651	0,1305	3,8306
Průměr	0,1529	4,4867	0,1574	4,6202
Odchylka	0,0167	0,4905	0,0394	1,1553

7.2.2 Hodnoty měření 2

Měření 2 proběhlo po kondicionaci tělesa 24 hod., kdy tělesa byly následně ochlazena na zkušební teplotu $t = -40\text{ °C}$, energie kladiva byla zvolena 2,8 J při konfiguraci zkoušky Izod. Při tomto měření byly použity tělesa pracovníě označené jako trámek.

Tab. 8. Hodnoty 2. měření

Číslo měření	PB 0110M		PB 8640M	
	Energie W [J]	Energie A_{cN} [kJ/m ²]	Energie W [J]	Energie A_{cN} [kJ/m ²]
1.	0,1446	4,2445	0,1446	4,2445
2.	0,1133	3,3257	0,1133	3,3257
3.	0,1143	3,3551	0,1143	3,3551
4.	0,1278	3,7514	0,1278	3,7514
5.	0,1737	5,0987	0,1737	5,0987
6.	0,2039	5,9852	0,2039	5,9852
7.	0,1844	5,4128	0,1844	5,4128
8.	0,1583	4,6466	0,1583	4,6466
Průměr	0,1525	4,4775	0,1525	4,4775
Odchylka	0,0312	0,9172	0,0312	0,9172

7.2.3 Hodnoty měření 3

Měření 3 proběhlo po kondicionaci tělesa při pokojové teplotě 168 hod., kdy materiál PB-1 již transformoval do fáze 1. Vzorky byly následně ochlazené na zkušební teplotu $t = -40\text{ }^{\circ}\text{C}$, kdy energie použitého kladiva byla 2,8 J při konfiguraci metody Izod. Pro tuto zkoušky byly opět zvolené zkušební vzorky pracovně označené jako trámek.

Tab. 9. Hodnoty 3. měření

Číslo měření	PB 0110M		PB 8640M	
	Energie W [J]	Energie A_{cN} [kJ/m ²]	Energie W [J]	Energie A_{cN} [kJ/m ²]
1.	0,2177	6,3902	0,2173	6,3785
2.	0,2101	6,1672	0,1957	5,7445
3.	0,2437	7,1534	0,2060	6,0468
4.	0,2346	6,8863	0,1944	5,7063
5.	0,2245	6,5898	0,1729	5,0752
6.	0,2236	6,5634	0,1927	5,6564
7.	0,2119	6,2200	0,1748	5,1310
8.	0,2222	6,5223	0,1690	4,9607
9.	0,2168	6,3638	0,1791	5,2572
10.	0,2191	6,4313	0,1519	4,4588
Průměr	0,2224	6,5288	0,1854	5,4415
Odchylka	0,0097	0,2837	0,0184	0,5398

7.2.4 Hodnoty měření 4

Měření 4 proběhlo po kondicionaci vzorků 192 hod., kdy zkušební vzorky byly ochlazovány 24 hod. na zkušební teplotu $t = -40^{\circ}\text{C}$. Energie použitého kladiva byla 2,8 J, konfigurace zkoušky byla však přenastavena pro zkušební metodu Charpy. Při této zkoušce byly využity zkušební vzorky pracovníě označené jako lopatka. Tyto tělíška bylo tedy nutno před zkouškou a kondicionací mechanicky oddělit od zbytku vstřikovaného tělesa.

Tab. 10. hodnoty 4. měření

Číslo měření	PB 0110M		PB 8640M	
	Energie W [J]	Energie A_{cN} [kJ/m ²]	Energie W [J]	Energie A_{cN} [kJ/m ²]
1.	0,2807	8,2395	0,1417	4,1594
2.	0,2489	7,3061	0,1249	3,6662
3.	0,2476	7,2679	0,1366	4,0097
4.	0,2666	7,8256	0,1756	5,1545
5.	0,2643	7,7581	0,1324	3,8864
6.	0,2333	6,8482	0,1341	3,9363
7.	0,2550	7,4851	0,1253	3,6780
8.	0,2310	6,7806	0,1579	4,6349
9.	0,2393	7,0243	0,1583	4,6466
10.	0,2260	6,6339	0,1278	3,7514
Průměr	0,2493	7,3169	0,1415	4,1523
Odchylka	0,0167	0,4894	0,0161	0,4734

7.2.5 Hodnoty měření 5

Měření 5 proběhlo po kondicionaci vzorku za pokojové teploty 192 hod., kdy zkušební vzorky byly ochlazeny na teplotu zkoušky $t = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Energie použitého kladiva při zkoušce byla 2,8 J při konfiguraci zkoušky metodou Charpy. Typem použitého zkušebního vzorku pro tuto zkoušku byly tělesa pracovníčně označené jako lopatka. Hodnoty označené jako „X“ byly označeny jako extrémní hodnoty souboru měření a byly vyřazeny ze souboru hodnot. Tyto byly zapříčiněny patrně hrubou chybou při měření.

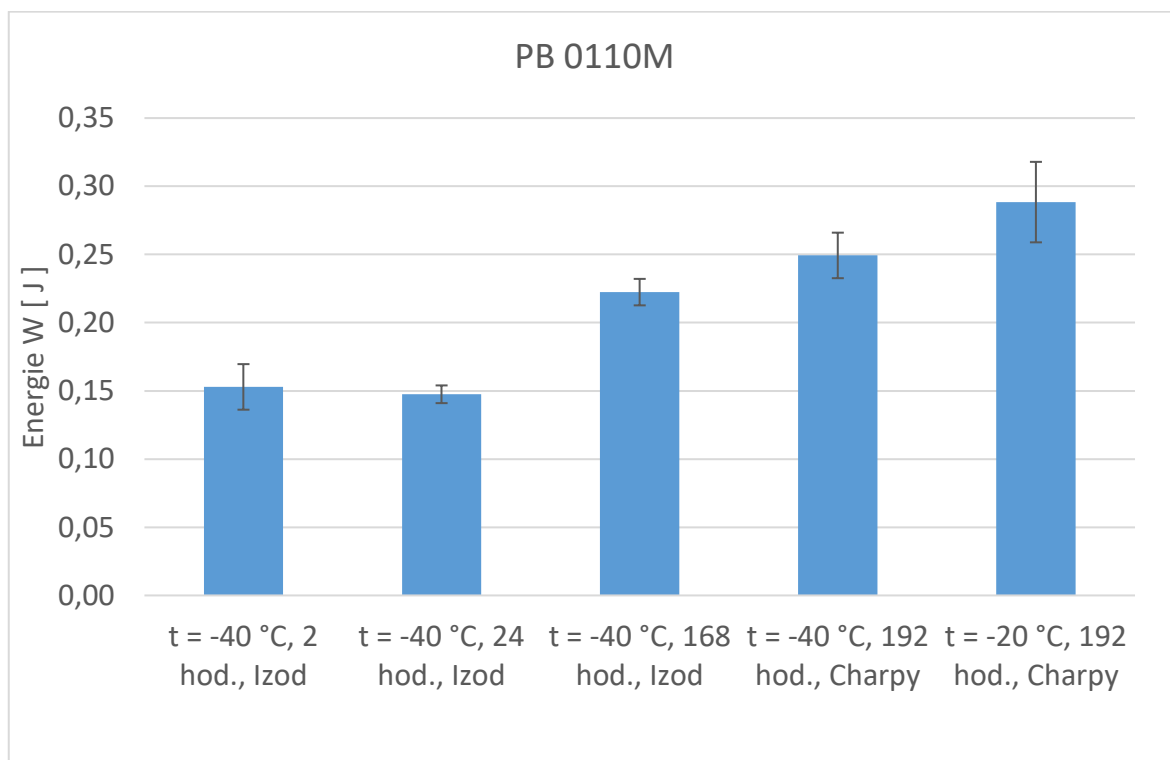
Tab. 11. Hodnoty 5. měření

Číslo měření	PB 0110M		PB 8640M	
	Energie W [J]	Energie A_{cN} [kJ/m^2]	Energie W [J]	Energie A_{cN} [kJ/m^2]
1.	0,3365	9,8774	0,2142	6,2875
2.	0,3202	9,3990	0,2310	6,7806
3.	0,2737	8,0340	0,2969	8,7150
4.	0,2888	8,4773	0,2079	6,1026
5.	0,2931	8,6035	0,2448	7,1857
6.	0,2282	6,6984	0,2870	8,4244
7.	0,2582	7,5791	0,1743	5,1163
8.	0,2807	8,2395	x	x
9.	0,3113	9,1377	x	x
10.	0,2931	8,6035	x	x
Průměr	0,2884	8,4649	0,2366	6,9446
Odchylka	0,0295	0,8661	0,0405	1,1888

7.3 Vyhodnocení výsledků měření rázové houževnatosti

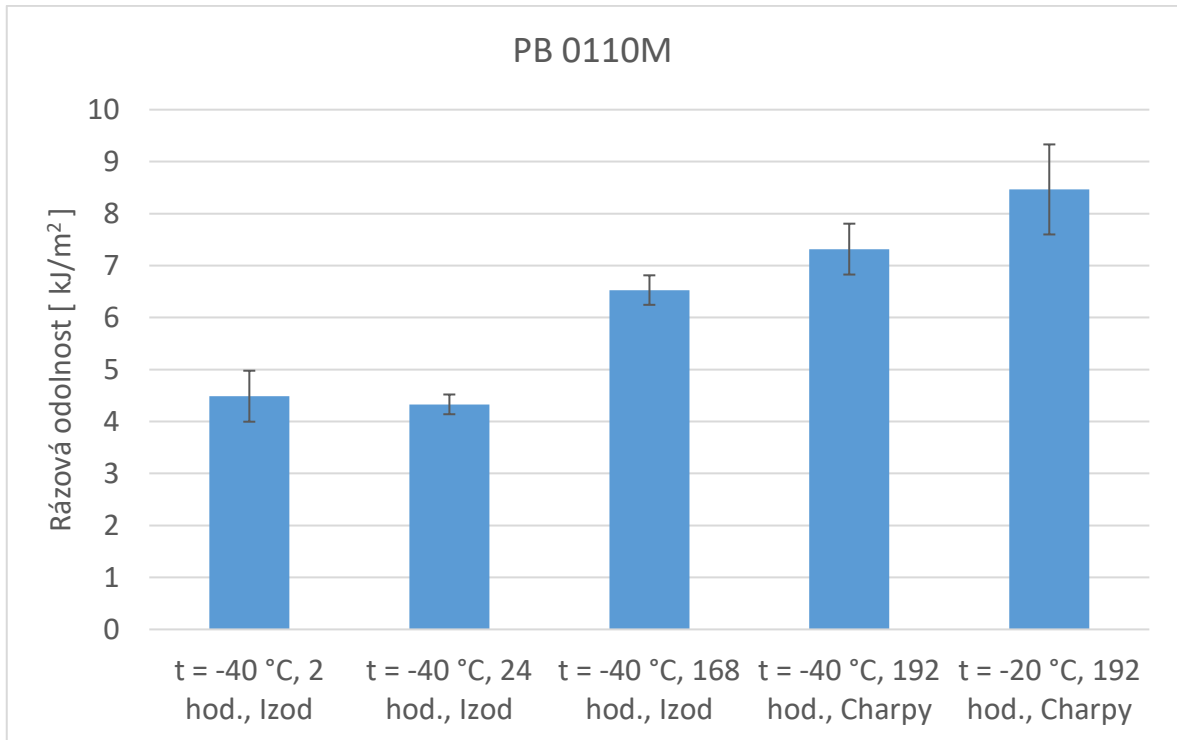
Při měření rázové houževnatosti jsou sledovány dva důležité parametry chování tělesa. Energie W , kterou zkušební těleso absorbuje při nárazu kyvadla a energii A_{cN} , což je energie W vztažená na průřezové charakteristiky tělesa. Tyto hodnoty můžeme následně porovnat pro zjištění chování obou materiálů pro určení jejich chování za rozdílných podmínek zkoušky.

7.3.1 PB 0110 M



Obr. 21. Průměrné hodnoty energie W pro materiál PB 0110M

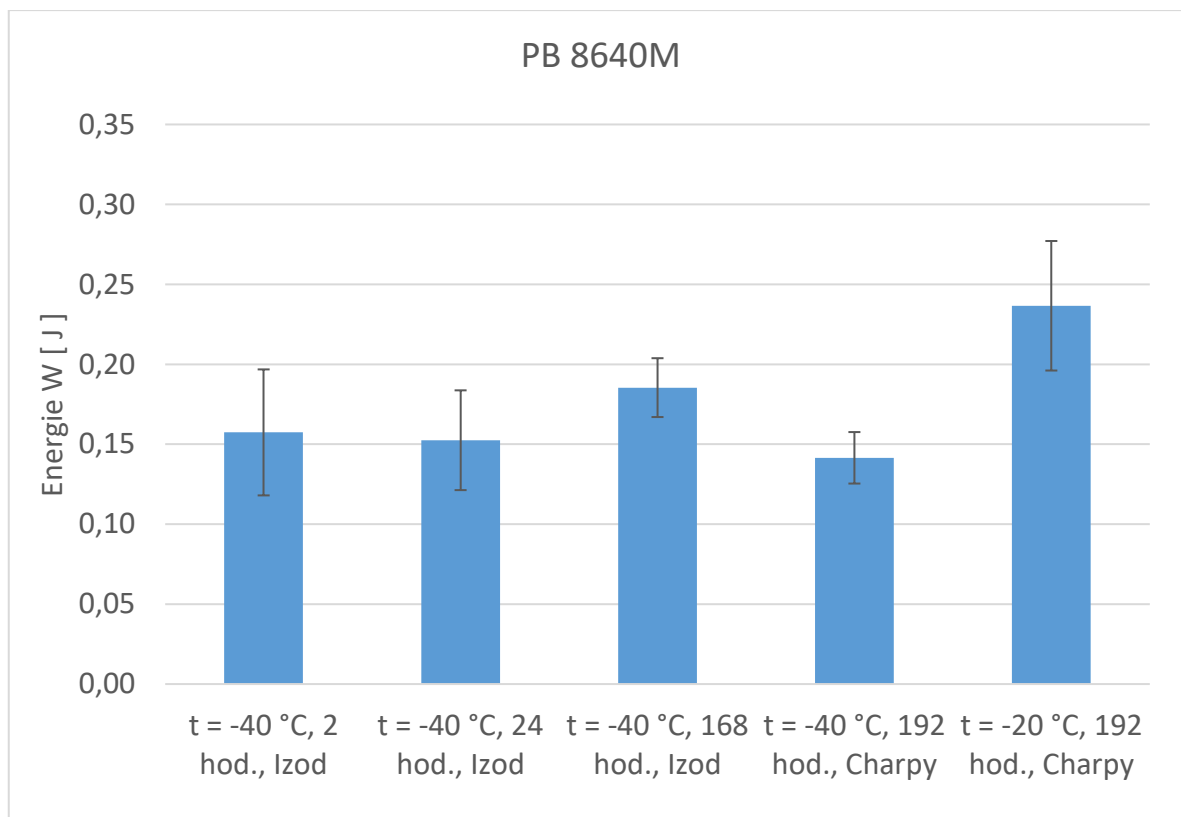
Z grafu na obr. 21. je jasně patrné, že nejvyšších odchylek měření bylo dosaženo při využití metody Charpy. Odchylka při teplotě $t = -20\text{ °C}$ s průměrnou naměřenou hodnotou 0,2884 J zde dosahuje 0,0295 J. Druhá nejvyšší odchylka měření je zde shodně 0,0167 J pro měření 1 a 4, kdy ovšem odchylku měření 1 můžeme zdůvodnit nízkým stářím zkušebních vzorků.



Obr. 22. Průměrné hodnoty rázové odolnosti pro materiál PB 0110M

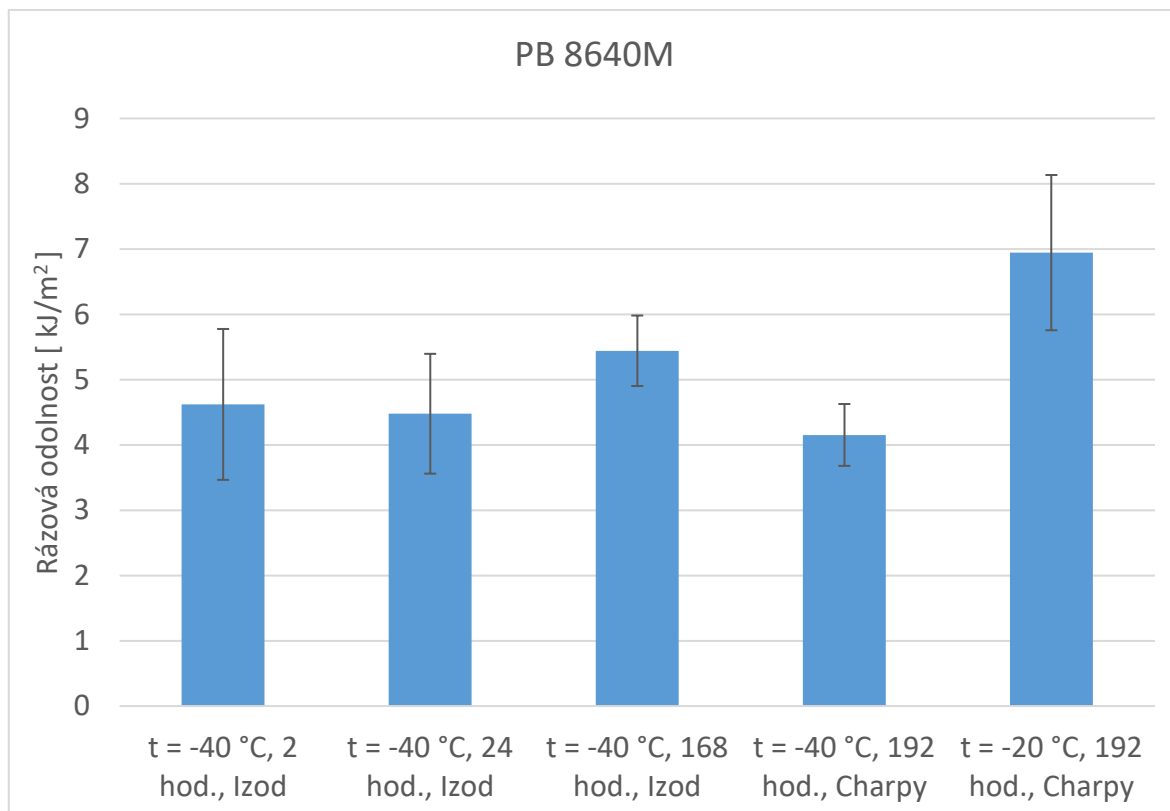
Z průměrných hodnot rázové odolnosti v grafu na obr. 22. je jasně patrné, že nejvyšší rozptyl mají měření prováděné metodou Charpy prováděné při teplotách $t = -20\text{ °C}$ s hodnotou odchylky $1,19\text{ kJ/m}^2$, respektive odchylkou $0,49\text{ kJ/m}^2$ při měření metodou Charpy za teploty $t = -40\text{ °C}$. Při měření číslo 1, kdy bylo využito konfigurace Izod při zkušební teplotě $t = -40\text{ °C}$ na vzorcích o stáří 2 hod od výroby můžeme pozorovat vyšší odchylku měření, což mohlo být způsobeno vyšší elasticitou materiálu při krystalické fázi II.

7.3.2 PB 8640M



Obr. 23. Průměrné hodnoty energie W pro materiál PB 8640M

Z grafu znázorněném na obr. 23. je jasně patrné, že nejvyšších odchylek bylo dosaženo pro měření 1 a měření 5. Při měření 1, kdy metodou Izod při teplotě $t = -40\text{ °C}$ bylo dosaženo průměrné hodnoty energie $W = 0,1574\text{ J}$ s výraznější odchylkou $0,0394\text{ J}$. Při měření 5. za použití konfigurace Charpy při teplotě $t = -20\text{ °C}$ bylo dosaženo průměrné hodnoty $W = 0,2366\text{ J}$ s nejvyšší odchylkou ze všech měření $0,0405\text{ J}$. Tato vyšší odchylka byla zapříčiněna vyšší teplotou zkoušení, kdy vzorky vykazují vyšší elasticitu materiálu, čímž ovlivňují kvalitu naměřených dat.



Obr. 24. Průměrné hodnoty rázové odolnosti materiálu PB 8640M

Z grafu na obr. 24. je jasně patrný obdobný trend vývoje hodnot rázové odolnosti jako v případě energie W . Nejvyšších odchylek bylo dosaženo při použití metody Charpy za teplot $t = -20\text{ °C}$, kdy při průměrné hodnotě $6,95\text{ kJ/m}^2$ bylo dosaženo odchylky $1,19\text{ kJ/m}^2$. Vyšší odchylky zde vykazují i měření při teplotách $t = -40\text{ °C}$ při konfiguraci Izod na zkušebních vzorcích o stáří 2 hod, respektive 24 hod. Tyto odchylky je však opět možno přičíst vysokému podílu krystalizační fáze II v měřených vzorcích, kdy vzorky vykazují zvýšenou elasticitu. V případě transformovaného materiálu je však patrné snížení úchylnosti měření, kdy při měření 3 bylo dosaženo průměrné hodnoty $5,44\text{ kJ/m}^2$ s odchylkou měření $0,54\text{ kJ/m}^2$.

8 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Cílem bakalářské práce je nalezení vhodného nastavení podmínek měření pro měření transformovaného i netransformovaného polybutenu-1 při jednotných podmínkách zkoušení. Mezi hlavní proměnné podmínky řadíme stáří vzorku, vzhledem k transformaci materiálu do několika fází, rozdílnou teplotu provedení zkoušky rázové houževnatosti a rozdílné metody vrubové zkoušky rázové houževnatosti provedené metodou Charpy, respektive metodou Izod.

Z měření vrubové rázové houževnatosti homopolymeru i kopolymeru polybutenu-1 je jasně patrné zvýšení rozptylu hodnot v případě použití konfigurace zkoušky Charpy, kdy odchylky naměřených hodnot rázové odolnosti vzrostli až dvojnásobně oproti metodě Izod. Jako referenční hodnota zde poslouží rozdíl mezi měřením 3 a 4 rázové houževnatosti pro materiál PB 0110M, kdy v případě měření metodou Izod bylo dosaženo průměrné odchylky měření $0,28 \text{ kJ/m}^2$, při použití metody Charpy tato odchylka vzrostla na $0,49 \text{ kJ/m}^2$.

V případě vlivů fázových transformací vlivem stáří výrobku je z grafu 2 viditelný skok v rázové odolnosti materiálu PB 0110M mezi měřeními provedenými 2, respektive 24 hod. od výroby zkušebních vzorků a mezi měřeními, které probíhaly až po 7, respektive 8 dny od výroby. Toto je zapříčiněno fázovou transformací polybutenu-1, kdy transformace z krystalické fáze II do fáze I trvá přibližně 7 dní. Materiál ve fázi I má poté prokazatelně lepší odolnost vůči rázovému namáhání. Rázová odolnost mezi měřením 2 a měřením 3 vzrostla průměrně o více než 2 kJ/m^2 .

Při porovnání všech provedených měření je jasně patrné, že při konfiguraci, použité pro měření 3, které proběhlo při zkušební teplotě $t = -40 \text{ }^\circ\text{C}$ metodou Izod vykazují oba materiály nejnižší odchylky při měření rázové houževnatosti. Této skutečnosti bylo dosaženo právě kombinací použité metody Izod a zkušební teplotou $t = -40 \text{ }^\circ\text{C}$, při nichž je materiál dostatečně tuhý pro správné provedení zkoušky rázové houževnatosti, respektive úplné přeražení zkušebních vzorků. Této skutečnosti napomáhá i stáří zkušebních vzorků, které bylo v případě 3. měření 168 hodin, kdy je materiál již převážně transformován do fáze I. Výhodou metody Izod je také fakt, že na rozdíl od metody Charpy je při metodě Izod těleso pevně uchyceno, čímž dochází k částečné eliminaci vlivů pružnosti materiálu, pokud zkušební těleso nedosahuje potřebného stáří.

Z výše uvedeného vyplývá, že pro dosažení vhodných podmínek měření je v případě polybutenu-1 nutná zkušební teplota $t = -40 \text{ }^\circ\text{C}$ pro dokonalé lámání zkušebních těles.

ZÁVĚR

Bakalářská práce zkoumala vhodné nastavení podmínek měření pro měření transformovaného a netransformovaného polybutenu-1 při jednotných podmínkách zkoušky. Pro provedení zkoušky byl vytvořen soubor 100 vzorků pro homopolymer PB 0110M a 100 vzorků pro kopolymer PB 8640. Tyto vzorky byly následně podrobeny vrubové zkoušce rázové houževnatosti metodou Izod a metodou Charpy. Výsledky měření byly následně statisticky vyhodnoceny a graficky znázorněny pro přehledné porovnání a zvolení ideálního nastavení podmínek měření.

Z grafů je jasně patrné, že nejnižší odchylky měření bylo dosaženo při konfiguraci použité pro měření 3., kdy na zkušebních vzorcích o stáří 168 hod bylo za teploty $t = -40\text{ }^{\circ}\text{C}$ provedeno měření vrubové rázové houževnatosti metodou Izod, s využitím kladiva o energii 2,8 J. Tato kombinace podmínek měření byla úspěšně použita pro měření rázové houževnatosti i na čerstvě vyrobených vzorcích.

Pokusné měření se zvýšenou teplotou ($-20\text{ }^{\circ}\text{C}$) a měření metodou Charpy přineslo vyšší úchylnost měření, vlivem zvýšené elasticity materiálu při vyšších teplotách. Na základě vyzkoušených kombinací a hodnot odchylek jednotlivých měření byly metoda Izod a zkušební teplota $t = -40\text{ }^{\circ}\text{C}$ zvolené jako ideální kombinace nastavení podmínek měření pro měření vrubové rázové houževnatosti transformovaného i netransformovaného polybutenu-1.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] KASZONYIOVÁ, Martina a Philip H. GAIL, 2005. *Journal of Macromolecular Science: Polymorphism of isotactic poly(butene-1)*. vol. 44 B. ISSN 0022-2348.
- [2] DUCHÁČEK, Vratislav, 2006. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT. ISBN 80-708-0617-6.
- [3] RYBNIKÁŘ, František, 2000. *Makromolekulární chemie: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 2., přeprac. Brno: Vysoké učení technické. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-1556-8.
- [4] WYPYCH, George, 2012. *Handbook of polymers*. Toronto: ChemTec Pub. ISBN 978-1-895198-47-8.
- [5] LEDNICKÝ, František a George WYPYCH, 2009. *Mikroskopie a morfologie polymerů*. V Liberci: Technická univerzita. ISBN 978-80-7372-487-0.
- [6] RYBNÍKÁŘ, František. 1987 *Makromolekulární chemie II*. Brno: Rektorát Vysokého učení technického v Brně.
- [7] KUTZ, Myer, 2011. *Applied plastics engineering handbook: processing and materials*. Boston: elsevier/William Andrew. ISBN 1437735142.
- [8] ZEMAN, Lubomír, 2009. *Vstřikování plastů: úvod do vstřikování termoplastů*. Praha: BEN - technická literatura. ISBN 978-80-7300-250-3.
- [9] MCKEEN, Laurence W., 2017. *Film Properties of Plastics and Elastomers*. 4th Edition. Elsevier. ISBN 978-0-12-813292-0.
- [10] HYLTON, Donald C., 2004. *Understanding Plastics Testing*. Hanser Publishers. ISBN 978-1-56990-366-7.
- [11] GRELLMANN, Wolfgang a Sabine SEIDLER, 2007. *Polymer Testing*. Hanser Publishers.
- [12] *Zkouška rázem v ohybu* [online], 2020. Brno: Vysoké učení technické [cit. 2020-04-28]. Dostupné z: <http://drogo.fime.vutbr.cz/opory/pdf/umvi/zk.raz.ohybu.pdf>
- [13] EZRIN, Myer, 2013. *Plastics Failure Guide - Cause and Prevention*. (2nd Edition). ISBN 978-1-56990-449-7.
- [14] KUNZ, Jiří, 1994. *Základy lomové mechaniky*. 2. přeprac. vyd. Praha: České vysoké učení technické. ISBN 80-010-1215-8.

- [15] ČSN EN ISO 179-1, 2000. *Plasty - Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy: Část 1: Neinstrumentovaná rázová zkouška.*
- [16] *Toppyl PB 0110M: Product Data and Technical Information* [online], 2018. [cit. 2020-05-10]. Dostupné z: <https://www.lyondellbasell.com/en/polymers/p/PB-0110M/233fe77c-aff4-4b05-bff5-b44e00d965b8>
- [17] *Toppyl PB 8640M: Product Data and Technical Information* [online]. [cit. 2020-05-10]. Dostupné z: <https://www.lyondellbasell.com/en/polymers/p/Toppyl-PB-8640M/b95b9ee9-ac43-435d-a666-03bb5a945afc>
- [18] KIRAN, D. R., 2019. *Production Planning and Control - A Comprehensive Approach.* Elsevier. ISBN 978-0-1281-8364-9.
- [19] WHITE, James L. a David D. CHOI, 2005. *Polyolefins - Processing, Structure Development, and Properties.* Hanser Publishers. ISBN 978-1-56990-369-8.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

PB-1	Polybuten-1
M_w	Molekulární hmotnost
W	Energie spotřebovaná tělesem při přeražení
W_1	Potenciální energie kladiva ve výchozí poloze
W_2	Potenciální energie kladiva při výchylce opačnou stranou
h_1	Výška výchylky kyvadla po zkoušce
g	Gravitační konstanta
l	délka
$\cos \alpha$	Výchylka kyvadla v pozici připraveno ke zkoušce
$\cos \beta$	Výchylka kyvadla v při výchylce opačnou stranou
A_{CU}	Energie pohlcená při přeražení tělesa bez vrubu vztažená na jeho průřez
E_C	Energie pohlcená tělesem
h	šířka
b	tloušťka
A_{CN}	Energie pohlcená při přeražení tělesa s vrubem vztažená na jeho průřez
b_N	tloušťka tělesa pod vrubem
T_g	Teplota skelného přechodu
T_m	Teplota tání krystalů
σ_C	kritické napětí
K_c	lomová houževnatost
G_c	energie lomu vztažená na plochu
E	Modul pružnosti
ν	Poissonova konstanta
γ	povrchové napětí materiálu
τ_{xy}	smyková složka tenzoru napětí

σ_y	tahová složka tenzoru napětí
τ_{yz}	střihová složka tenzoru napětí
x_n	hodnota v souboru hodnot
n	celkový počet hodnot
PE	polyethylen
r_N	poloměr kořene vrubu
t	teplota

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Schéma střídavého kopolymeru.....	16
Obr. 2. Schéma random kopolymeru	16
Obr. 3. Schémata blokových kopolymerů	17
Obr. 4. Schéma roubovaného kopolymeru	17
Obr. 5. Struktura Polybutenu-1	19
Obr. 6. Schéma Charpyho kladiva	21
Obr. 7. uložení vzorků a směr rázového zatížení.....	21
Obr. 8. Typy vrubů	22
Obr. 9. Uložení zkušební tělesa podle Charpy edgewise.....	23
Obr. 10. Graf znázorňující závislost mezi vadou materiálu a kritickým zatížením.....	28
Obr. 11. Typy šíření trhlin	29
Obr. 12. Vstřikovací stroj DEMAG ergotech 50-200 system.....	36
Obr. 13. Testovací vzorky před oddělením od vtokové soustavy.....	38
Obr. 14. Vrub typu A	38
Obr. 15. Vrubovací zařízení s vrubovacím nožem typu A	39
Obr. 16. Chladicí zařízení CharpyCool	40
Obr. 17. Grafický výstup zařízení Tinius Olsen IT 503	41
Obr. 18. Zkušební stroj IT 503	42
Obr. 19. Šíření trhliny při neúspěšné zkoušce na vzorku PB 0110M.....	43
Obr. 20. Šíření trhliny při neúspěšné zkoušce na vzorku PB 8640M.....	43
Obr. 21. Průměrné hodnoty energie W pro materiál PB 0110M	49
Obr. 22. Průměrné hodnoty rázové odolnosti pro materiál PB 0110M	50
Obr. 23. Průměrné hodnoty energie W pro materiál PB 8640M	51
Obr. 24. Průměrné hodnoty rázové odolnosti materiálu PB 8640M	52

SEZNAM TABULEK

Tab. 1. Struktura a vlastnosti polybutenu-1	15
Tab. 2. Krystalická mřížka, teploty tání a hustoty fází PB-1	18
Tab. 3. typy zkušebních těles, rozměry a vzdálenosti podpěr podle normy ISO 179.....	22
Tab. 4. Přehled základních materiálových vlastností PB 8640M a PB 0110M.....	35
Tab. 5. Hodnoty vstřikovacího cyklu.....	37
Tab. 6. Rozměry použitého zkušebního tělesa	39
Tab. 7. Hodnoty 1. měření	44
Tab. 8. Hodnoty 2. měření	45
Tab. 9. Hodnoty 3. měření	46
Tab. 10. hodnoty 4. měření	47
Tab. 11. hodnoty 5. měření	48